

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**ФАКУЛЬТЕТ ПРИКЛАДНОЇ МАТЕМАТИКИ
КАФЕДРА СИСТЕМНОГО ПРОГРАМУВАННЯ І
СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ**

«На правах рукопису»
УДК 004.9

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри СПСКС

(підпис) В.П.Тарасенко
(ініціали, прізвище)
“ ” _____ 2018р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра**

зі спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія»

«Комп'ютерні системи та компоненти»

на тему: Спосіб визначення просторового положення об'єктів на основі
алгоритму TDOA

Виконав: студент II курсу, групи КВ-61м

Дончак Олексій Володимирович
(прізвище, ім'я, по батькові)

Науковий керівник: доцент кафедри СПіСКС, к.т.н.,

доцент Петрашенко А.В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2018 року

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет прикладної математики

Кафедра системного програмування і спеціалізованих комп'ютерних систем

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

«Комп'ютерні системи та компоненти»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри СПіСКС

_____ В.П.Тарасенко _____
(підпис) (ініціали, прізвище)

«__» _____ 201_р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Дончаку Олексію Володимировичу**

1. Тема дисертації: спосіб визначення просторового положення об'єктів на основі алгоритму TDOA,
науковий керівник дисертації: доцент кафедри СПіСКС, к.т.н., доцент
Петрашенко А.В.,
затверджені наказом по університету від «22» березня 2018 р. №986-с.
2. Термін подання студентом дисертації 11 травня 2018 р._____
3. Об'єкт дослідження: орієнтовані на розв'язання задач моніторингу сенсорні мережі.
4. Предмет дослідження: методи та алгоритми визначення просторового положення об'єктів.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити:
 - провести аналіз використання сенсорних мереж для моніторингу довкілля;
 - дослідити методи відслідковування об'єктів сенсорними мережами;
 - розробити та дослідити імітаційну модель відслідковування стаціонарних та рухомих об'єктів сенсорною мережею;
 - обґрунтувати вибір складових частин сенсорної мережі;
 - запропонувати спосіб організації сенсорних мереж для відслідковування координат стаціонарних та рухомих об'єктів.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу:

- узагальнена схема обміну повідомленнями в мережі;
- схема роботи контролера TDOA-групи;
- узагальнена схема формування часу реакції мережі на подію;
- загальна схема функцій мережі;
- схема потоку даних в мережі;
- діаграма «сутність-зв'язок» моделі мережі.

7. Орієнтовний перелік публікацій:

- Петрашенко А. В., Дончак О. В., «Організація сенсорних мереж для визначення просторових координат об'єктів», ПМК 2017, Київ, 19-21 квітня 2017 р.;
- Andrii Petrashenko, Denis Zamiatin, Oleksii Donchak, «Model of Reconfigured Sensor Network for the Determination of Moving Objects Location», Advances in Computer Science for Engineering and Education, June 10 2018, ISBN 978-3-319-91008-6, Series ISSN 2194-5357, 802 pages.

8. Дата видачі завдання 5 вересня 2016 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Грунтовне ознайомлення з предметною галуззю	18.12.2016	
2.	Визначення структури магістерської дисертації; вивчення літератури, пошук додаткової літератури, патентний пошук	05.03.2017	
3.	Робота над першим розділом магістерської дисертації; проведення наукового дослідження	15.05.2017	
4.	Проведення наукового дослідження; робота над другим розділом магістерської дисертації; розроблення програмного забезпечення	12.10.2017	
5.	Проведення наукового дослідження; робота над статтею за результатами наукового дослідження	16.12.2017	
6.	Проведення наукового дослідження; робота над третьім розділом магістерської дисертації;	21.02.2018	
7.	Завершення роботи над основною частиною магістерської дисертації; підготовка ілюстративного матеріалу;	15.04.2018	
8.	Оформлення текстової і графічної частини магістерської дисертації	20.04.2018	
	Попередній розгляд магістерської дисертації на кафедрі	26.04.2018	

Студент

Науковий керівник дисертації

Дончак О. В

Петрашенко А. В.

РЕФЕРАТ

Актуальність теми. Моніторинг навколишнього середовища за допомогою сенсорних мереж в цілому і відслідковування координат невідомих об'єктів в тому числі розглядаються у численних дослідженнях. В той час, як більша частина робіт присвячена неперервному стеженню за сигнатурою об'єкта спостереження за допомогою звукових чи магнітних сенсорів, розпізнавання одиночних та серійних звукових подій потребує додаткового вивчення. Крім того, якість роботи подібних систем в умовах наявності багатьох об'єктів спостереження, а також шумів та завад досліджена недостатньо. Тому дослідження використання алгоритму TDOA в сенсорних мережах, призначених для відслідковування координат та траєкторій невизначеної кількості рухомих об'єктів, є корисним і дозволить підвищити ефективність роботи таких мереж за критеріями як охопленої площі, так і кількості використовуваних для цього сенсорів без втрати якості розпізнавання.

Об'єктом дослідження є орієнтовані на розв'язання задач моніторингу сенсорні мережі.

Предметом дослідження є алгоритми та методи визначення просторового положення об'єктів.

Метою роботи є підвищення ефективності відслідковування координат об'єктів сенсорними мережами, обміну службовою та змістовною інформацією між їх вузлами та серверами у складі інформаційно-моніторингових систем для різних предметних галузей.

Методи дослідження: математичне й імітаційне моделювання, методи аналізу і синтезу та методи розподілених обчислень.

Наукова новизна:

Вперше запропоновано спосіб організації сенсорних мереж для визначення просторового положення об'єктів, який дозволяє зменшити обчислювальні витрати, рівень мережного трафіку і збільшити охоплювану площу спостереження та відрізняється тим, що:

- замість акустичної сигнатури об'єкта спостереження розпізнаються генеровані ним звукові події;
- функція обробки сенсорних даних частково виконується в рамках сенсорних вузлів;
- підтримується автоматизована реконфігурація мережі;
- використовується алгоритм TDOA.

Практична цінність отриманих в роботі результатів полягає в тому, що розроблена програмна модель дозволяє описати роботу сенсорних мереж, що використовуються для відслідковування координат об'єктів, і надавати інформацію про те, якою траєкторією рухались об'єкти. Розроблена імітаційна модель дозволяє перевірити роботу мереж у різних тестових випадках.

Апробація роботи. Основні положення і результати роботи були представлені на міжнародній науково-технічній конференції «The First International Conference on Computer Science, Engineering and Educational Applications» (Київ, 18-20 січня 2018 р.) та обговорювалися на науковій конференції магістрантів та аспірантів «Прикладна математика та комп'ютеринг» ПМК-2017 (Київ, 19-21 квітня 2017 р.).

Структура та обсяг роботи. Магістерська дисертація складається з вступу, чотирьох розділів та висновків.

У вступі подано загальну характеристику роботи, зроблено оцінку сучасного стану проблеми, обґрунтовано актуальність напрямку досліджень, сформульовано мету і задачі досліджень, показано наукову новизну отриманих результатів і практичну цінність роботи, наведено відомості про апробацію результатів і їхнє впровадження.

У першому розділі розглянуто загальні положення відслідковування координат об'єктів сенсорними мережами, їх внутрішню будову та механізм керування обміну повідомленнями, розглянуто різні їх реалізації.

У другому розділі розглянуто організацію та принцип роботи сенсорних мереж з використанням алгоритму TDOA.

У третьому розділі наведена реалізація системи імітації поведінки сенсорних мереж, збору, обміну та обробки сенсорних даних.

У четвертому розділі проаналізовані результати імітації, наведені графіки залежності результату від зміни параметрів програмної моделі.

У висновках представлені результати проведеної роботи.

Робота представлена на 92 аркушах, містить посилання на список використаних літературних джерел з 18 найменувань. У роботі наведено 62 рисунка та 4 таблиці.

Ключові слова: сенсор, сервер, TDOA, сенсорні мережі.

ABSTRACT

Theme urgency. Environment monitoring using sensor networks in general as well as tracking the coordinates of unknown objects are subjects of numerous studies. While the majority of them are devoted to the continuous monitoring of the signature of the object of observation with the help of sound or magnetic sensors, single and serial sound event recognition requires additional study. In addition, the operation quality of such systems in the presence of many objects of observation, as well as noises and obstacles is not investigated sufficiently. Therefore, research into the use of the TDOA algorithm in sensor networks for tracking coordinates and trajectories of an uncertain number of moving objects is useful and will increase the efficiency of such networks according to the criteria of both the covered area and the number of sensors used, without loss of recognition quality.

Object of research are sensor networks for environment monitoring.

Subject of research are algorithms and methods for determination of spatial object coordinates.

Research objective is to increase the effectiveness of both tracking object coordinates with sensor networks and information exchange between their nodes and servers in monitoring systems for various subject areas.

Research methods. Mathematical and simulation modeling, methods of analysis and synthesis and methods of distributed computing.

Scientific novelty:

For the first time, a method allowing to reduce both computational costs and network traffic level as well as increase the coverage of the observed area for organizing sensor networks for determining the spatial position of objects is proposed and differs in the following:

- generated sound events are recognized instead of the acoustic signature of the object of observation,;
- data processing function is partially performed by sensor nodes;
- supported automated reconfiguration of the network;

- usage of the TDOA algorithm.

Practical value of the obtained results is that the developed software model allows to describe the work of sensor networks used to track the coordinates of objects and provide information about the trajectory of moving objects. The developed simulation model allows to check the network performance in various test cases.

Approbation. The main provisions and results of the work were presented at the international scientific and technical conference "The First International Conference on Computer Science, Engineering and Educational Applications" (Kyiv, January 18-20, 2018) and were discussed at the scientific conference of undergraduates and postgraduates «Applied Mathematics and Computing» PMK-2017 (Kyiv, April 19-21, 2017).

Structure and content of the thesis. The work consists of an introduction, four chapters and conclusions.

The introduction gives a general description of the work, assesses the current state of the problem, substantiates the relevance of the research direction, formulates the purpose and objectives of the research, shows the scientific novelty of the results obtained and the practical value of the work, provides information on the results approbation and implementation.

The first chapter deals with the general provisions for tracking the coordinates of objects with sensor networks, their internal structure and mechanisms for managing messaging, considering their various implementations.

The second chapter describes the organization and work of sensor networks using the TDOA algorithm.

The third chapter presents the implementation of a system simulating the behavior of sensor networks as well as collecting, exchanging and processing sensor data.

The fourth chapter analyzes the results of simulations, shows the graphs of the dependence of the result from the parameters of the software model.

The conclusions are the results of the work.

The thesis is presented in 92 pages, contains 18 references to the used information sources. 62 figures and 4 tables are given in the thesis.

Keywords: sensor, server, TDOA, sensor networks.

РЕФЕРАТ

Актуальность темы. Мониторинг окружающей среды с помощью сенсорных сетей в целом и отслеживание координат неизвестных объектов в том числе рассматриваются в многочисленных исследованиях. В то время, как большая часть работ посвящена непрерывному слежению за сигнатурой объекта наблюдения с помощью звуковых или магнитных сенсоров, распознавание одиночных и серийных звуковых событий требует дополнительного изучения. Кроме того, качество работы подобных систем в условиях наличия многих объектов наблюдения, а также шумов и помех исследовано недостаточно. Поэтому исследование использования алгоритма TDOA в сенсорных сетях, предназначенных для отслеживания координат и траекторий неопределенного количества подвижных объектов, является полезным и позволит повысить эффективность работы таких сетей по критериям как охваченной площади, так и количества используемых для этого сенсоров без потери качества распознавания.

Объектом исследования являются ориентированные на решение задач мониторинга сенсорные сети.

Предметом исследования являются алгоритмы и методы определения пространственного положения объектов.

Целью работы является повышение эффективности отслеживания координат объектов сенсорными сетями, обмена служебной и содержательной информацией между их узлами и серверами в составе информационно-мониторинговых систем для различных предметных областей.

Методы исследования: математическое и имитационное моделирование, методы анализа и синтеза, методы распределенных вычислений.

Научная новизна:

Впервые предложен способ организации сенсорных сетей для определения пространственного положения объектов, позволяющий

уменьшить вычислительные затраты, уровень сетевого трафика и увеличить охватываемую площадь наблюдения, который отличается тем, что:

- вместо акустической сигнатуры объекта наблюдения распознаются генерируемые им звуковые события;
- функция обработки сенсорных данных частично выполняется в рамках сенсорных узлов;
- поддерживается автоматизированная реконфигурация сети;
- используется алгоритм TDOA.

Практическая ценность полученных в работе результатов заключается в том, что созданная программная модель позволяет описать работу сенсорных сетей, используемых для отслеживания координат объектов, и предоставлять информацию о том, по какой траектории двигались объекты. Разработанная имитационная модель позволяет проверить работу сетей в различных тестовых случаях.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы были представлены на международной научно-технической конференции «The First International Conference on Computer Science, Engineering and Educational Applications» (Киев, 18-20 января 2018) и обсуждались на научной конференции магистрантов и аспирантов «Прикладная математика и компьютеринг» ПМК-2017 (Киев, 19-21 апреля 2017).

Структура и объем работы. Магистерская диссертация состоит из введения, четырех глав и выводов.

Во введении представлена общая характеристика работы, произведена оценка современного состояния проблемы, обоснована актуальность направления исследований, сформулированы цели и задачи исследований, показана научная новизна полученных результатов и практическая ценность работы, приведены сведения об апробации результатов и их внедрении.

В первом разделе рассмотрены общие положения отслеживания координат объектов сенсорными сетями, их внутреннее устройство и

механизмы управления обмена сообщениями, рассмотрены различные их реализации.

Во втором разделе рассмотрены организация и принципы работы сенсорных сетей с использованием алгоритма TDOA.

В третьем разделе приведена реализация системы имитации поведения сенсорных сетей, сбора, обмена и обработки сенсорных данных.

В четвертом разделе проанализированы результаты имитации, приведены графики зависимости результата от изменения параметров программной модели.

В выводах представлены результаты проведенной работы. Работа представлена на 92 листах, содержит ссылки на список использованных литературных источников из 18 наименований. В работе приведены 62 рисунка и 4 таблицы.

Ключевые слова: сенсор, сервер, TDOA, сенсорные сети.

ЗМІСТ

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	5
1 Сенсорні мережі. Порівняльна характеристика методів та засобів моніторингу середовища.....	6
1.1 Організація моніторингу навколишнього середовища.....	6
1.2 Класифікація сенсорних мереж.....	7
1.3 Вимоги до сенсорних мереж.....	12
1.4 Сенсорні мережі для відслідковування об'єктів.....	13
1.5 Висновки.....	17
2. Організація сенсорних мереж для відслідковування просторового положення об'єктів.....	18
2.1 Алгоритм TDOA.....	18
2.2 Звукові сенсори.....	21
2.3 Задача відслідковування об'єктів.....	23
2.3.1 Розміщення сенсорів.....	23
2.3.2 Групування сенсорів.....	26
2.3.3 Робота TDOA-контролера.....	29
2.3.4 Потік даних.....	32
2.3.5 Час реакції на подію.....	34

2.4 Висновки.....	37
3 Імітаційна модель та алгоритми.....	38
3.1 Загальний опис.....	38
3.2 Робота моделі.....	40
3.3 Потік даних в моделі.....	48
3.4 Висновки.....	52
4 Експериментальне дослідження моделі.....	53
4.1 Фіксовані джерела, малі інтервали генерації.....	53
4.2 Фіксовані джерела, збільшені інтервали генерації.....	66
4.3 Рухоме джерело звуку.....	79
4.4 Висновки.....	87
ВИСНОВКИ.....	88
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	90

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

GPRS (англ. General Packet Radio Service) – надбудова над технологією мобільного зв'язку GSM, що здійснює пакетну передачу даних.

GSM (англ. Global System for Mobile Communications) – глобальний стандарт цифрового мобільного стільникового зв'язку.

SOLID (англ. Single responsibility, Open-closed, Liskov substitution, Interface segregation, Dependency inversion) – основні принципи об'єктно-орієнтованого проектування.

TDOA (англ. Time Difference of Arrival) – підхід до визначення координат об'єктів.

WLAN (англ. Wireless Local Area Network) – локальна мережа, побудована на основі бездротових технологій.

Сенсор — вимірювальний пристрій у вигляді конструктивної сукупності одного або декількох вимірювальних перетворювачів величини, що вимірюється і контролюється, та котрий виробляє вихідний сигнал, зручний для дистанційного передавання, зберігання та використання у системах керування і має нормовані метрологічні характеристики.

ВСТУП

Кінець 20-го та початок 21-го століть характеризуються стрімким прогресом у сфері інформаційних технологій. Продовження тенденції до здешевлення різного роду сенсорних пристроїв, а також зменшення їх фізичних розмірів призводить до масового їх використання у різних галузях народного господарства і охоронній сфері. Зважаючи на наявність різноманітних підходів до вирішення задачі відслідковування положень об'єктів реального світу, проблема ефективної організації для цього сенсорних мереж досі є актуальною.

На теперешній час існують декілька підходів до задачі визначення просторових координат об'єктів за допомогою сенсорних пристроїв. Вона може бути зведеною до задачі розпізнавання образів у рухомих та нерухомих зображеннях, побудови інерціальних навігаційних систем або пеленгації за допомогою радіохвиль.

Перелічені підходи можуть бути ефективно застосовані для вирішення представленої задачі за деякими обмеженнями. Вони мають значну обчислювальну складність (розпізнавання образів) [1], потребують безпосереднього доступу до об'єктів (інерціальні навігаційні системи) [2, 3] або вимагають складного комплексу обладнання (радіопеленгація) [3]. В той же час, на відстанях порядку від 10 м до 10 км можуть застосовуватись звукові хвилі, виявлення яких здійснюється в тому числі за допомогою простих звукових сенсорів [3].

Отже, з метою забезпечення наближення ефективності роботи сенсорних мереж, що виконують визначення просторових координат невідомих об'єктів з використанням звукових сенсорних пристроїв, до оптимального за критеріями охоплення якнайбільшої площі покриття якомога меншим числом сенсорних пристроїв, необхідна розробка відповідних алгоритмів, що б враховували вищевказані параметри.

1 Сенсорні мережі. Порівняльна характеристика методів та засобів моніторингу середовища

1.1 Організація моніторингу навколишнього середовища

Моніторинг навколишнього середовища привертає увагу багатьох фахівців у галузі і став об'єктом численних досліджень. Під моніторингом звичайно розуміється визначення статусу змінюваного середовища за допомогою аналізу репрезентативної вибірки звідти. Отже, збір даних є значущою частиною такого моніторингу.

Системи збору даних повинні надавати достатню кількість результатів вимірювань, при цьому приймаючи до уваги такі фактори, як рівень втручання, точність чи надійне збереження. В залежності від потреб, області застосування та типу даних, їх збір може виконуватись різним чином. Традиційні підходи до збору даних включають в себе відбір проб, станції спостереження та віддалене спостереження[1].

В той час, як відбір проб не користується такою популярністю, як раніше, через технологічний прогрес, в деяких випадках він залишається єдиним виходом, коли потрібно принести в дослідження елемент випадковості або здійснити більш комплексний аналіз матеріалів, ніж можливий у польових умовах. Однією значущою вразливістю такого підходу є необхідність безпосередньої присутності людини, що підвищує як часові та матеріальні витрати, так і рівень втручання.

Під станціями спостереження розуміються сенсорні системи, що розміщені у деяких визначених точках і проводять вимірювання оточуючих областей неперервно чи із заданими інтервалами. Такі системи зберігають результати вимірювань локально або транслюють їх далі, тим значно зменшуючи об'єм людської праці.

Віддалене спостереження здійснюється за допомогою супутників або літальних апаратів, з застосуванням розпізнавання зображень або

випромінювань. Через дистанційну природу такого підходу забезпечується покриття великих зон та небезпечних середовищ, але втрачається локальна роздільна здатність.

Усі перераховані методи потребують більшого об'єму роботи для отримання більшої вибірки (наприклад, спостереження у декількох точках однієї місцевості). В цей же час, ідеалізована бездротова сенсорна мережа сама спостерігає за місцевістю з будь-якої кількості точок і автоматично транспортує дані у потрібне місце призначення через мережеву інфраструктуру. Більш того, автономна робота дозволяє вимірювання з мінімальним рівнем втручання, а також у жорстких або екстремальних умовах[2].

Оскільки сенсорні мережі звичайно поєднуються з оператором через локальні та глобальні мережі передачі даних, забезпечується надходження даних в режимі, близькому до реального часу. Це зменшує час реакції системи на події порівняно з підходом, коли дані зберігаються у локальному сховищі і завантажуються вручну у призначений час. Крім того, віддалене з'єднання з сенсорною мережею означає нівелювання відстані між кінцевим користувачем і об'єктом моніторингу [2], оскільки дослідник може прямо спостерігати за тим, що відбувається у конкретній потрібній йому зоні. В будь-якому випадку, моніторинг навколишнього середовища може здійснюватись по-різному, і різні застосування висувають до сенсорних мереж різні вимоги.

1.2 Класифікація сенсорних мереж

Згідно однієї з класифікацій, такі мережі можна розділити на керовані часом (time-driven), подіями (event-driven) або запитам (query-driven)[3]. У більшості випадків використовується керування часом (безперервна або періодична робота), а класифікація торкається в першу

чергу мережної активності систем.

Згідно неї, керовані часом системи звичайно передають показники сенсорів періодично, що є типовим для систем збору даних, наприклад, описаних в [4, 5]. Системи, керовані подіями, використовуються у випадках, коли необхідно мінімізувати вихідний трафік з мережі та обмежити об'єм малозначущих даних, що надходять до сховища. Такі мережі спостерігають за потрібними зонами і передають сенсорні дані тільки в тих випадках, коли відбуваються деякі події, як пожежа [6] чи вторгнення [7]. Системи, керовані запитами, зберігають отримані дані локально і надають їх за запитами. Подібний тип мереж може бути корисним у логістиці чи при домашньому застосуванні, але мало застосовується для моніторингу навколишнього середовища.

Системні вимоги до мереж можуть сильно варіюватись в залежності від області застосування. В той час, як керовані часом системи більш піддаються організації і контролю, особливо з точки зору мережного трафіку, керовані подіями системи можуть бути менш передбачуваними. Це накладає свої обмеження на архітектуру систем, в тому числі протоколи обміну повідомленнями, які не завжди можуть бути взаємозамінними [1].

У випадку моніторингу навколишнього середовища системами, що відслідковують настання різного роду подій, важливою частиною процесу роботи сенсорної мережі є як отримання даних з первинних вимірювальних пристроїв, так і наступна їх обробка. При цьому важливим є як збереження якомога більшої кількості даних, так і зменшення часу реакції системи на подію. Прикладами подібних систем є відслідковування руху техніки [8], виявлення вторгнень [9] чи спостереження у небезпечних умовах [10]. В свою чергу, отримані дані становляться вхідними для розпізнавання факту настання події за визначених умов. В той час, як процес вимірювання є керованим часом і проводиться неперервно чи

періодично, виходом системи є інформаційні повідомлення про деякі розпізнані в межах мережі події.

На відміну від чистих систем збору даних, об'єм вихідного мережного трафіку є меншим через наявності попередньої обробки сенсорних даних, але і вузли мережі в такому випадку становляться складнішими. Дійсно, порівняно простих сенсорних пристроїв у такому випадку недостатньо, адже до функцій збору та мережевої передачі додається ще функція цифрової обробки. Крім того, необхідна значуща кількість порівняно простих пристроїв з метою охоплення якомога більшої площі без втрати потрібної просторової роздільної здатності.

Збільшення числа вузлів ставить вже нові задачі, як обробка, валідація та візуалізація даних, комунікаційні та конфігураційні протоколи, а також розгортання та підтримка подібних мереж. На рисунку 1.2.1 зображено типову схему такої мережі.

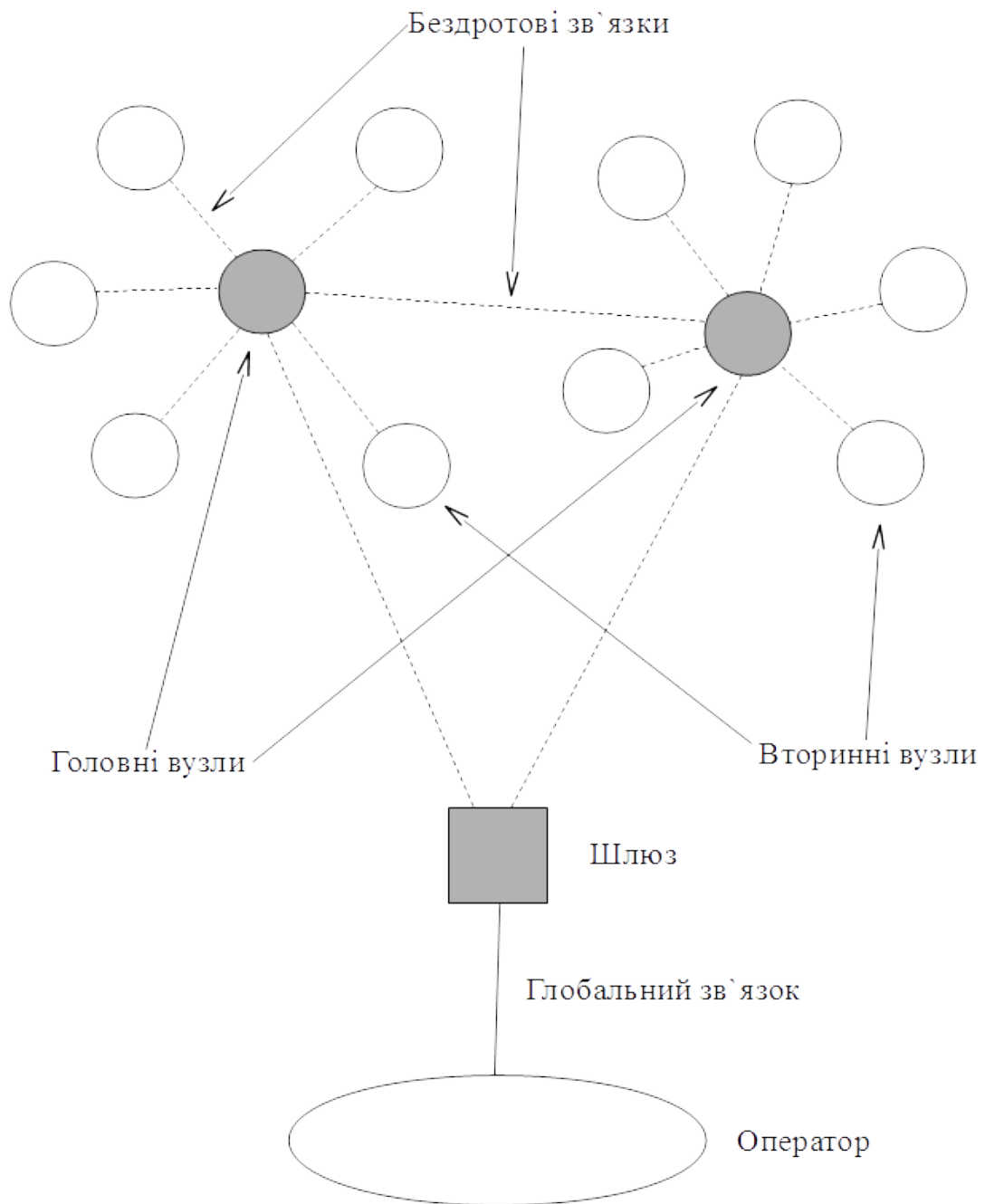


Рисунок 1.2.1 — Схема бездротової сенсорної мережі

Оскільки багато сенсорних мереж розгортається віддалено від оператора, виокремлено локальну і глобальну частини процесу. Локальна частина включає в себе сенсорні (вторинні) вузли, які власне вимірюють параметри оточуючого середовища, але поєднані з глобальною частиною деяким родом шлюзу. Топологія мережі представляє собою гібрид «зірка-

меш», що знайшла широке застосування в подібних системах [8, 9, 11].

Також необхідно зазначити деяку відмінність між головними та підлеглими вузлами. В той час, як звичайні сенсорні вузли спілкуються тільки зі своїми відповідними головними вузлами, головні вузли також взаємодіють між собою різним чином, щоб спрямувати потік даних до шлюзу. Така структура дозволяє більшості вузлів мережі бути порівняно простими, на відміну від небагатьох більш інтелектуальних і споживаючих більше ресурсів. У будь-якому разі, така топологія має свої недоліки, пов'язані з розділенням відповідальності між вузлами [1].

Незважаючи на відсутність єдиної точки відмови, помилки у функціонуванні головних вузлів можуть призвести до проблем у роботі багатьох, не обов'язково прямо пов'язаних з ними, підлеглих вузлів. Оскільки деякі сенсорні вузли, спочатку під'єднані до тих головних, які відмовили, можуть приєднатись до інших кластерів, може настати такий випадок, коли вузли, що знаходяться у віддалених від центра охоплення зонах, не зможуть приєднатись до будь-якого кластера, розміщеного поза зоною їх досяжності. Більше того, відмова головного вузла може також перервати шлях від інших головних вузлів до шлюзу, призводячи до відокремлення частини мережі. Вплив деяких з цих недоліків можна зменшити правильним плануванням розгортання, надлишковістю у маршрутах комунікації та запасними головними вузлами.

Глобальна частина звичайно складається зі зберігання даних та їх обробки, наприклад, на відповідному сервері. Там дані перетворюються у форму, зрозумілу операторам та дослідникам. Зв'язок між сенсорною та глобальною частинами встановлюється за допомогою шлюзів з використанням, наприклад, GSM/GPRS, WLAN та інших. В деяких випадках застосовується радіозв'язок з великою відстанню передачі [10, 11].

1.3 Вимоги до сенсорних мереж

Хоча обмеження застосування, а тому і параметри системи, значно варіюються між різними мережами моніторингу середовища, спільним є прагнення до забезпечення якомога більшого часу роботи системи, а також її живучості. В той час, як тривалість роботи є одним з параметрів рівня проектування сенсорної мережі, він особливо важливий для систем моніторингу оточуючого середовища.

Бездротові сенсорні мережі дозволяють автономне спостереження за значними зонами. В ідеальному випадку, визначена кількість сенсорних вузлів розподіляється по широкому середовищу, у віддалених або небезпечних зонах, після чого організує свою роботу і відправлення даних спостерігачам без необхідності додаткової уваги.

Одним з основних параметрів вузлів також є ефективність їх енергоспоживання. Дійсно, якщо з'явиться необхідність у регулярному відвідуванні зони розгортання з метою заміни або перезарядки батарей, цей факт нівелює усі переваги, надані таким типом систем. Оскільки живучість системи є дуже важливою при її застосуванні, вона досліджувалась як параметр усіх рівнів сенсорних мереж, наприклад у [12]. В той же час, визначення тривалості роботи бездротової сенсорної мережі не є однозначним, а аналіз різних класів цих визначень проводився у [13].

Іншою проблемою є процес класифікації вузлів перед розгортанням. Визначення числа підлеглих вузлів на невідомій місцевості є майже неможливим за умови дозволу динамічної маршрутизації. Подальші критичні та некритичні визначення можна зробити, приймаючи до уваги інші фактори, наприклад, важливість сенсора [7]. Це можливо за деяких застосувань, але не для всіх. Дійсно, у процесі контролю роль сенсора наперед відома, а тому з'ясована важливість отримання його даних. Але

безпосередньо під час моніторингу середовища важливість даних з деякої позиції невизначена, а тому неможлива і класифікація [1].

Також критеріями можуть слугувати наявність зв'язку та покриття [8]. Покриття означає охоплення зони спостереження сенсорами. Поки потрібна територія знаходиться у радіусі дії заздалегідь визначеної кількості сенсорів, мережа може виконувати поставлені перед нею задачі і вважається роботоздатною. Під наявністю зв'язку в даному випадку розуміється наявність доступу до сховища даних, а не загальний ступінь зв'язку. Але і ці два параметри взаємопов'язані. Дійсно, покриття є важливим, адже мережа розгортається в першу чергу для отримання даних, хоча може стати непотрібним у разі втрати з нею зв'язку.

В будь-якому випадку, тривалість роботи мережі, розрахована на основі наведених вище значень, змінюється за тим же законом, що і просто за прийняттям до уваги кількості працюючих вузлів. Визначення ж заздалегідь часу втрати зв'язності та важливості покриття деякої зони вважається достатньо складним, якщо взагалі можливим [4, 5, 11].

1.4 Сенсорні мережі для відслідковування руху об'єктів

Відслідковування руху об'єктів сенсорними мережами може успішно здійснюватись з використанням різних архітектур мереж [8], застосованих сенсорів [9] і отримуваних результатів [10]. Існує деяка кількість типів сенсорних пристроїв, що широко застосовуються в подібних мережах для відстеження об'єктів завдяки їх низькому рівню енергоспоживання, невеликим розмірам та загальноціновим рівнем [12].

Пасивні сенсори виявляють і вимірюють різноманітні сигнатури цілей, включно з магнітною температурною та акустичною. Активні ж, як ультразвукові сонари та радари, можуть з'ясовувати присутність цілі, дистанцію до неї, швидкість та напрямок руху залежно від її здатності

змінювати, відбивати та розсіювати сигнали сенсорів [7]. Системи моніторингу навколишнього середовища повинні існувати в неблагоприємних умовах, тому їх проектування обмежене практичними факторами. В таблиці 1.4.1 наведена характеристика деяких використовуваних сенсорів [8]:

Таблиця 1.4.1 — Коротка характеристика сенсорів

Сенсор	Сильні сторони	Слабкі сторони
Магнітометр	Порівняно низькочутливий до фізичного впливу типу струшування. Нечутливий до несприятливої погоди, як сніг, дощ чи туман.	Потребує розміщення великої кількості сенсорів для охоплення порівняно невеликої площі.
Мікрохвильовий радар	Пряме вимірювання швидкості руху цілі.	Не може відслідковувати нерухомі цілі.
Лазерний радар	За допомогою декількох променів точно вимірює позицію, швидкість та клас цілі.	Піддається впливу туману, снігу чи іншого затруднення видимості. Потребує періодичного обслуговування.
Пасивне інфрачервоне вимірювання	Може вимірювати швидкість цілі.	Працює тільки при хорошій видимості.

Сенсор	Сильні сторони	Слабкі сторони
Ультразвук	Похибка вимірювання до декількох міліметрів.	Працює тільки з об'єктами, що відбивають ультразвук. Піддається впливу коливань повітря.
Мікрофон	Працює пасивно. Мало чутливий до природних умов.	Потребує обробки потоку звукових даних.
Обробка образів	Надає багато даних. Широкий кут огляду.	Чутливий до загальної видимості, вимагає значних обчислювальних потужностей і якісних каналів передачі даних. Потребує періодичного обслуговування.
Інерціальні навігаційні системи	Можуть відслідковувати координати, швидкість та траєкторію цілі.	Потребують попереднього встановлення на цілі.

Для спостереження за великими територіями в рамках сенсорних мереж найбільш широко застосовуються інфрачервоні, магнітні та акустичні сенсори. Елементи ж інерціальних навігаційних систем застосовуються для виявлення факту втручання в роботу сенсорних вузлів [9], тому далі не розглядаються.

В роботі [9] наведено дослідження використання інфрачервоних сенсорів руху для виявлення вторгнень на задану територію. Необхідно

врахувати, що таким способом можна надійно виявити тільки сам факт вторгнення, але не його координати. Також, радіус дії інфрачервоних сенсорів руху не перевищує 10 метрів за ідеальної видимості. Крім того, зауважується про обмеженість кута огляду подібних сенсорів, що є близьким до 45 градусів. Таким чином, подібний підхід успішно застосовується, але у закритих приміщеннях або по периметру об'єкта спостереження.

У разі моніторингу порівняно великих середовищ (від десятків квадратних метрів і більше) має сенс застосовувати магнітометри та звукові сенсори. У роботах [7, 8, 10] наведено дослідження застосування такого роду сенсорів.

Робота [8] має суто теоретичний характер і присвячена теорії як розміщення сенсорів на площині, так і використовуваних для відслідковування алгоритмів. В ній доводиться можливість відслідковування та розпізнавання наземних цілей за їх акустичними та магнітними сигнатурами.

В роботах [7, 10, 12] наводиться дослідження застосування для цього магнітних сенсорів. Відмічаються висока якість розпізнавання, а також велика кількість сенсорів, що необхідна для охоплення порівняно невеликої зони (експериментально та теоретично 90 сенсорів для прямокутної зони розмірністю 18x7 метрів) [7]. Там же наводяться тези про те, що використання звукових сенсорів повинно збільшити охоплену площу в 10 разів за тієї ж кількості сенсорів без втрати якості розпізнавання та відслідковування.

В усіх цих роботах відслідковування цілей ведеться неперервно за їх сигнатурою (збурення магнітного поля навколо техніки в [7, 8], звук працюючого двигуна в [7, 10]), але обійдено увагою розпізнавання одиночних чи серій подій, як постріли, вибухи та інші після періодів тиші.

Крім того, в усіх наведених роботах фокус робиться на розпізнаванні та відслідковування тільки одиночної цілі без наявності шумів, завад чи інших об'єктів.

В роботі же [14] наводиться теоретичне дослідження точності роботи алгоритму TDOA [15], а в роботі [16] він застосовується для радіочастот. Отже, дослідження використання алгоритму TDOA в сенсорних мережах, призначених для відслідковування координат та траєкторій невизначеної кількості рухомих об'єктів, є корисним і дозволить підвищити ефективність роботи таких мереж за критеріями охопленої площі та кількості використовуваних для цього сенсорів.

1.5 Висновки

Моніторинг навколишнього середовища за допомогою сенсорних мереж в цілому і відслідковування координат невідомих об'єктів в тому числі розглядаються у численних дослідженнях. В той час, як більша частина робіт присвячена неперервному стеженню за сигнатурою об'єкта спостереження за допомогою звукових чи магнітних сенсорів, розпізнавання одиночних та серійних звукових подій потребує додаткового вивчення. Крім того, якість роботи подібних систем в умовах наявності багатьох цілей, а також шумів та завад досліджена недостатньо.

Таким чином, дослідження використання алгоритму TDOA в сенсорних мережах, призначених для відслідковування координат та траєкторій невизначеної кількості рухомих об'єктів, є корисним і дозволить підвищити ефективність роботи таких мереж за критеріями як охопленої площі, так і кількості використовуваних для цього сенсорів без втрати якості розпізнавання.

2 Організація сенсорних мереж для визначення просторового положення об'єктів

2.1 Алгоритм TDOA

Відслідковування об'єктів у просторі за допомогою звукових та магнітних сенсорів є можливим, як і описано в попередньому розділі. Хоча підхід із аналізом акустичної сигнатури об'єкта спостереження вивчений добре і застосовується у деяких галузях народного господарства, він має деякі обмеження. Застосування ж підходу із реакцією на звукові події могло б значно зменшити об'єм передачі даних по мережі, а також кількість дій, які необхідно виконати для отримання в результаті положення невідомого об'єкта, маючи на вході лише потік даних з сенсорів. В цьому розділі описано підхід до побудови таких мереж, їх архітектуру і параметри роботи.

Для визначення просторових координат об'єктів використовується алгоритм TDOA, суть якого полягає в наступному [15]:

1. На відомих позиціях $\{(x_m, y_m, z_m)\}_{m=1}^M$ розміщують $M \geq 5$ звукових сенсорів.
2. Фіксують v – швидкість розповсюдження звуку в операційному середовищі.
3. Вимірюють $\{\tau_m = t_m - t_1\}_{m=2}^M$ проміжки часу між моментами надходження звукової хвилі до звукових сенсорів з номерами m і звукового сенсора з номером 1.
4. Будують СЛАР наступного вигляду:

$$\begin{bmatrix} A_3 & B_3 & C_3 \\ A_4 & B_4 & C_4 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ A_M & B_M & C_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -D_3 \\ -D_4 \\ \vdots \\ -D_M \end{bmatrix}$$

$$A_m = \frac{1}{v \tau_m} (-2x_1 + 2x_m) - \frac{1}{v \tau_2} (-2x_2 + 2x_1)$$

$$B_m = \frac{1}{v \tau_m} (-2 y_1 + 2 y_m) - \frac{1}{v \tau_2} (-2 y_2 + 2 y_1)$$

$$C_m = \frac{1}{v \tau_m} (-2 z_1 + 2 z_m) - \frac{1}{v \tau_2} (-2 z_2 + 2 z_1)$$

$$D_m = v \tau_m - v \tau_2 + \frac{1}{v \tau_m} (x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - x_m^2 - y_m^2 - z_m^2) - \frac{1}{v \tau_2} (x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - x_2^2 - y_2^2 - z_2^2)$$

5. Розв'язанням вказаної СЛАР знаходять невідомі координати (x, y, z) джерела звукової хвилі.

Наведена вище система рівнянь містить в собі набір $\{\tau_m = t_m - t_1\}_{m=2}^M$, $M \geq 5$, для обчислення яких необхідно знати часи надходження звукової хвилі до сенсорів. Це накладає обмеження на можливу форму звукової хвилі. Дійсно, оскільки обчислюються проміжки часу між моментами надходження хвилі до сенсорів, то вважається, що цей час залежить виключно від фактичної відстані між відповідним сенсором та місцем виникнення звукової хвилі і швидкості поширення звуку у середовищі. Приймаючи таке положення, можна сформулювати п'ять обмежень системи: допускається розпізнавання тільки звукових подій, що викликають звукові хвилі зі сферичним фронтом. Іншими словами: для будь-якого місця виникнення звукової події та будь-якого місця розміщення звукового сенсора час затримки між моментом виникнення звукової події та її фіксацією сенсором є функцією відстані між місцем виникнення події та місцезнаходженням сенсора і звукопровідності середовища.

Під звукопровідністю середовища розуміється здатність середовища проводити звукові хвилі. Найбільш важливою характеристикою в даному випадку виступає швидкість поширення звуку в середовищі. Відповідно до [17] швидкість поширення звукової хвилі залежить від густини середовища. В реальному світі моніторинг навколишнього середовища з метою відслідковування об'єктів виконується у повітрі або воді. Тому є залежність швидкості поширення звуку уже від температури середовища.

На практиці це означає зміну швидкості поширення звуку від 315.72 м/с за -25°C до 354.94 м/с за 40°C у повітрі. Крім того, згідно [18] температура повітря змінюється від 15°C над рівнем моря до бл. -17°C на висоті 5000 м, що призводить до зміни швидкості звуку від бл. 340.3 м/с до бл. 322 м/с, що становить 5% різниці. Звідси впливає друге важливе обмеження системи: швидкість поширення звуку в середовищі є постійною, а саме середовище однорідним. Іншими словами: для будь-яких двох точок середовища час розповсюдження звукової хвилі, що виникла в одній з них, до іншої залежить виключно від відстані між цими точками.

Для алгоритму TDOA важливими є тільки часові затримки прибуття звукової хвилі до різних сенсорів. Гучність же звуку до уваги не береться. Це означає в тому числі повну непридатність такого підходу до визначення координат об'єктів за їх акустичними сигнатурами. Під акустичною сигнатурою мається на увазі характерний набір звуків, що генеруються об'єктом спостереження. Дійсно, це можливо тільки за ідеальних умов, що включають наявність єдиного джерела звуку, ідеальну сферичну форму звукових хвиль, відсутність шумів, завад та точну синхронізацію роботи усіх абсолютно однакових сенсорів. В разі ж, коли загальна акустична картина до уваги не береться, а розглядаються тільки випадки перевищення деякого порогу гучності, знижується об'єм даних для обробки в цілому, а алгоритм отримує необхідні часові затримки за умови виконання попередніх обмежень. Тому можна сформулювати третє обмеження системи: звуковою подією вважається вибух, постріл, удар або інші короткочасні звуки після періоду тиші.

2.2 Звукові сенсори

Характеристики звукових сенсорів мають велику значення. В той час, як чутливість звукового сенсора визначається за його технічними характеристиками, важливу роль грає форма зони його направленості. На рисунках 2.2.1 — 2.2.4 зображені зони направленості деяких найпоширеніших типів звукових сенсорів.

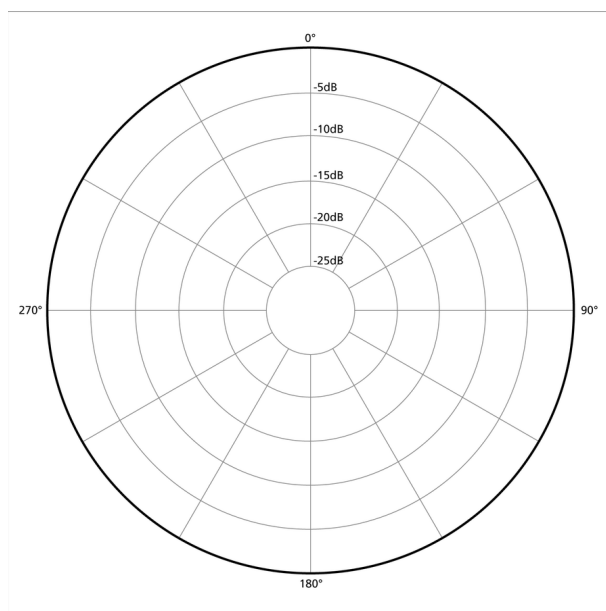


Рисунок 2.2.1 — Ненаправлений мікрофон

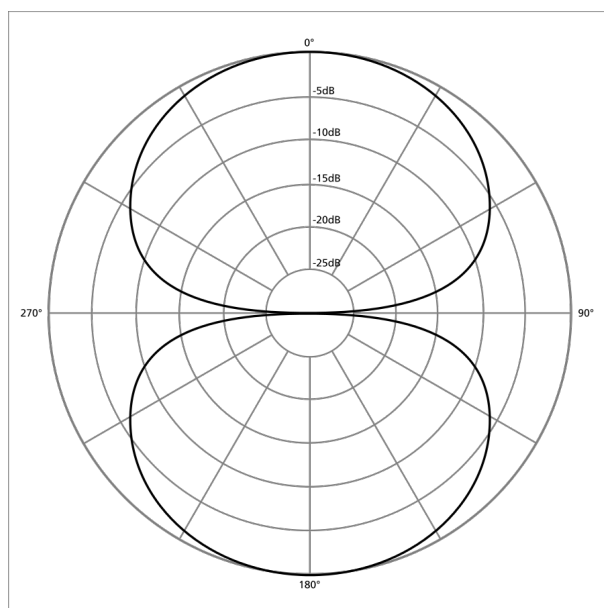


Рисунок 2.2.2 — Двонаправлений мікрофон

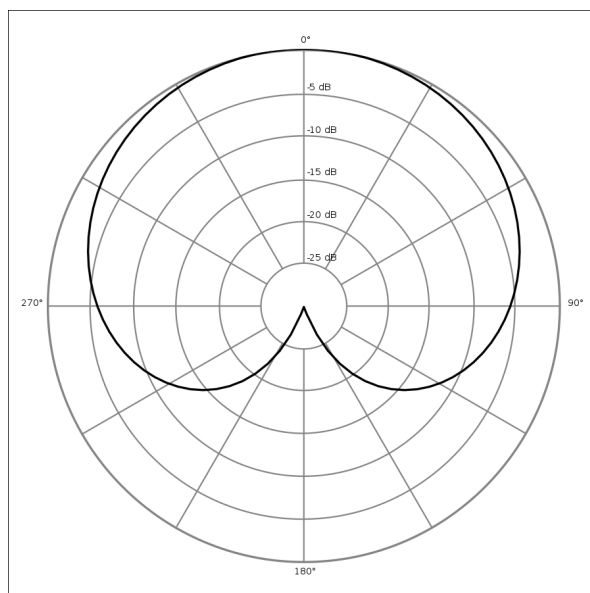


Рисунок 2.2.3 — Кардіоїдний мікрофон

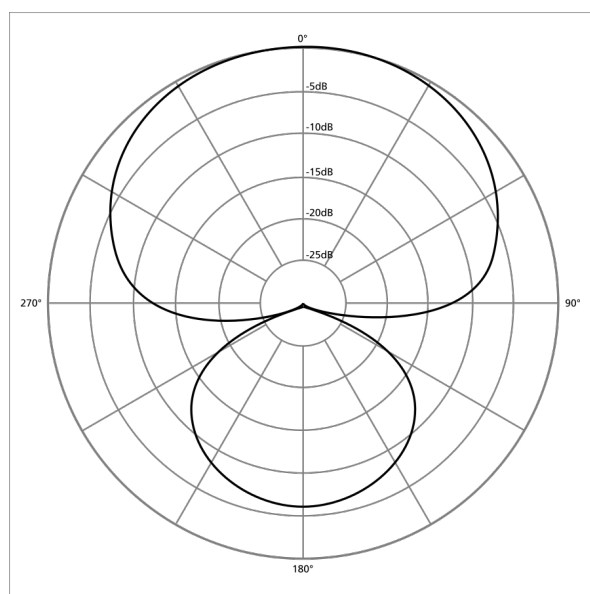


Рисунок 2.2.4 — Гіперкардіоїдний мікрофон

Як видно з наведених рисунків, розташування звукових сенсорів повинно здійснюватись з урахуванням їх направленості. Крім того, необхідно враховувати їхню чутливість, особливо за одночасного використання звукових сенсорів різних типів. Таким чином, можна сформулювати четверте обмеження системи: кожний звуковий сенсор має зону направленості і гарантовано зреагує на звукові події заданої інтенсивності, що відбулися в межах цієї зони.

2.3 Задача відслідковування об'єктів

2.3.1 Розміщення сенсорів

Усі зроблені в попередніх розділах припущення зводяться до описаних нижче.

1. Операційне середовище звукових сенсорних пристроїв є однорідним і характеризується постійною швидкістю поширення звукових хвиль.
2. Джерело звуку генерує сферичні звукові хвилі.
3. Звуковою подією вважається вибух, постріл, удар або інші короткочасні звуки після періоду тиші.
4. Кожний звуковий сенсор характеризується власним радіусом дії і гарантовано зреагує на звукові події заданої інтенсивності, що відбулися в межах цього радіусу.
5. Звукові сенсори розміщуються на площині.

Таким чином задача вирішується у декілька етапів. Спочатку виконується попереднє розміщення сенсорів на площині. Виходячи з наявності у кожного звукового сенсора деякої області направленості, а також в разі необхідності розпізнавати звукові події з інтенсивністю не менше заданої, пропонується вирішувати задачу з наступним формулюванням. Нехай є набір звукових сенсорів з заданими параметрами областей дії. Точка площини вважається охопленою тоді і тільки тоді, коли вона належить областям дії не менше, ніж п'яти сенсорів одночасно. Розмістити звукові сенсори на площині, забезпечивши охоплення максимальної площі. На рисунку 2.3.1.1 проілюстровано задачу для декількох ненаправлених звукових сенсорів.

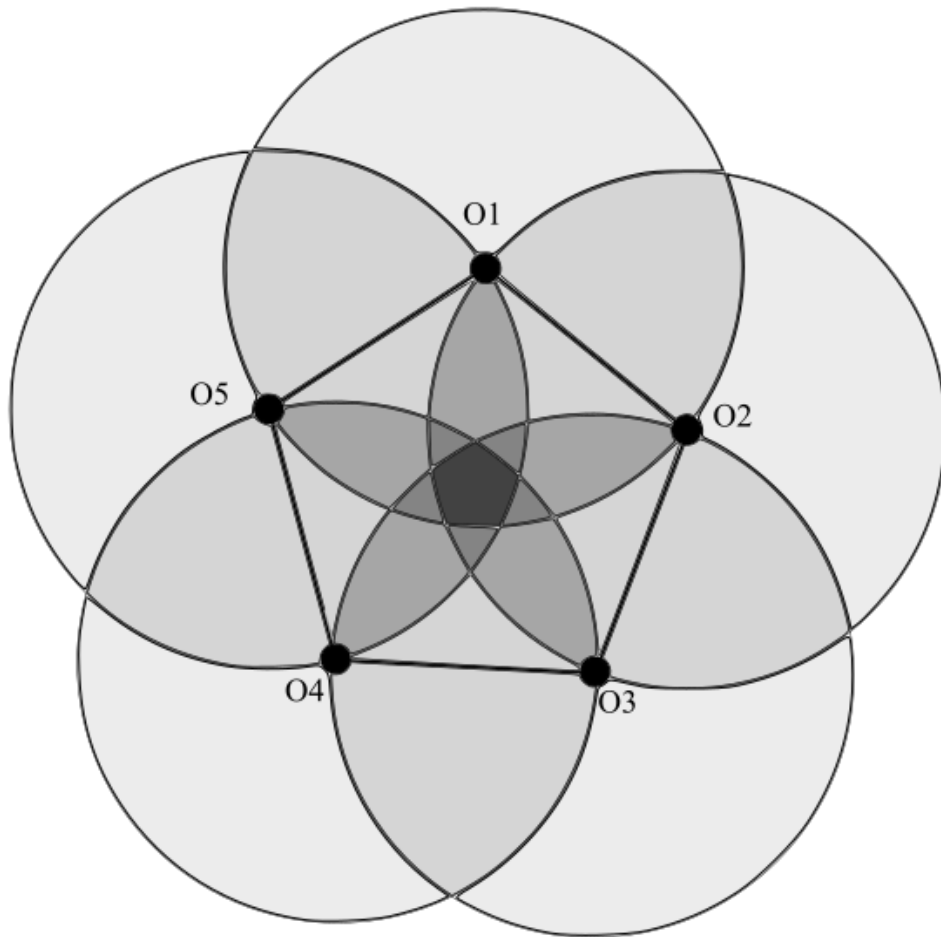


Рисунок 2.3.1.1 — Охоплення площини сенсорами

З рисунка видно, що тільки незначна область площини знаходиться у зоні дії п'ятих звукових сенсорів одночасно. Звукові події з заданою або меншою інтенсивністю, що відбуваються у інших областях, не будуть зафіксовані необхідною кількістю сенсорів, а тому обчислення їх координат буде неможливим. Ідеальний варіант розміщення п'яти сенсорів зображено на рисунку 2.3.1.2.

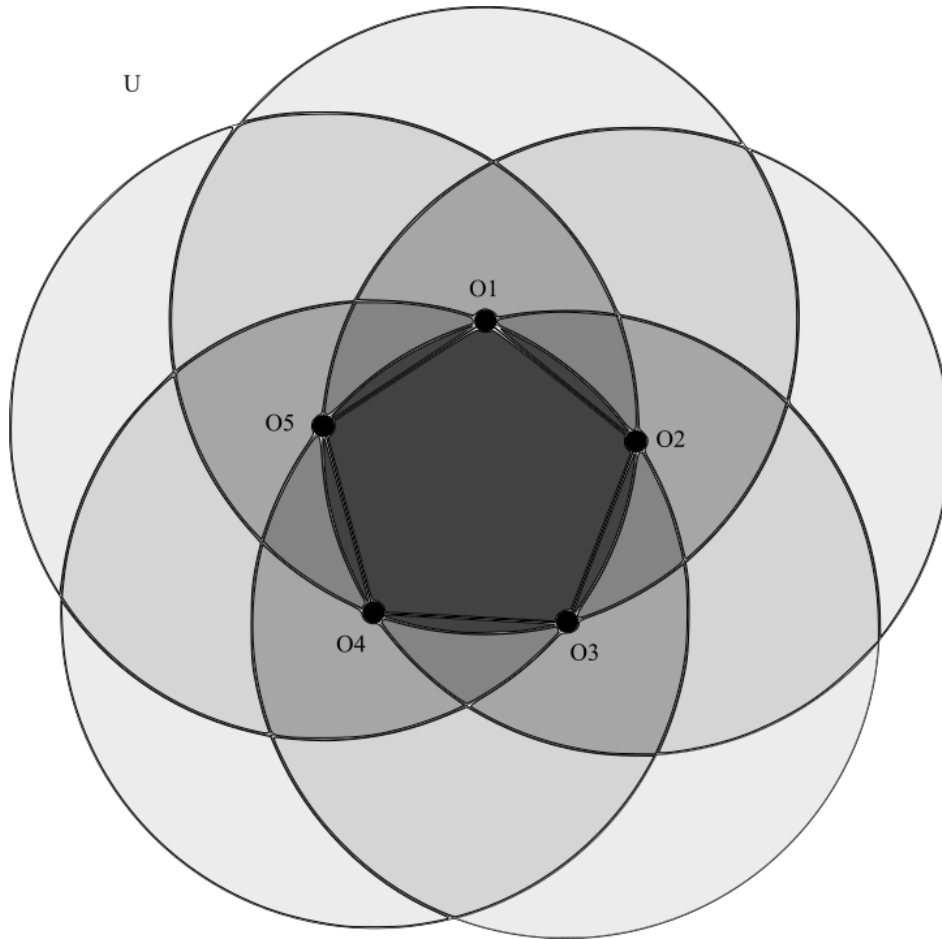


Рисунок 2.3.1.2 — Ідеальне розміщення п'яти сенсорів

Нескладно помітити, що за даних умов ідеальним варіантом було б розміщення сенсорів у вершинах правильного п'ятикутника $O_1O_2O_3O_4O_5$. Тоді охоплена площа буде максимальною і обчислюватиметься за формулою:

$$S = \frac{2d^2}{(1+\sqrt{5})\sqrt{5}},$$

де S – площа, охоплена TDOA-групою,

d – радіус дії звукового сенсора, рівний діагоналі п'ятикутника.

2.3.2 Групування сенсорів

Після розміщення сенсорів на площині виконується їх розбиття на TDOA-групи. Від цього залежить як об'єм оброблюваних мережею даних, так і спрямованість потоку даних. Один сенсор може належати декільком TDOA-групам одночасно. Для цього пропонується вирішувати задачу з наступним формулюванням. На площині розміщені звукові сенсори з заданими параметрами областей дії. TDOA-група складається не менше, ніж з п'яти сенсорів, що охоплюють хоча б одну спільну точку одночасно. Забезпечити охоплення максимальної площі мінімальною кількістю TDOA-груп. На рисунку 2.3.2.1 проілюстровано задачу для декількох ненаправлених сенсорів.

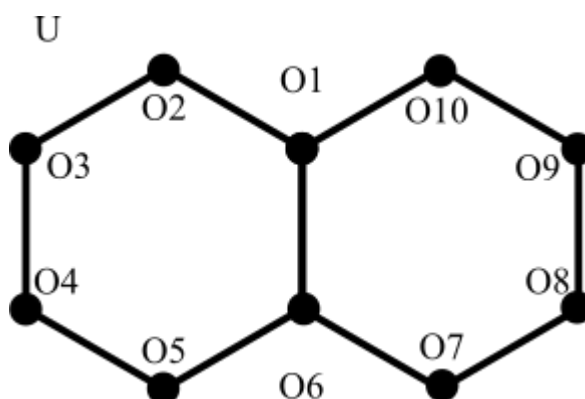


Рисунок 2.3.2.1 — Розміщення сенсорів

З рисунка видно, що наявні десять сенсорів, розміщених у вузлах двох однакових суміжних шестикутників. Згадка про те, що один сенсор може належати декільком групам одночасно є важливою. Дійсно, результат розбиття цих сенсорів на дві множини, що складають TDOA-групи, не перетинаються і охоплюють максимальну площу зображено на рисунку 2.3.2.2.

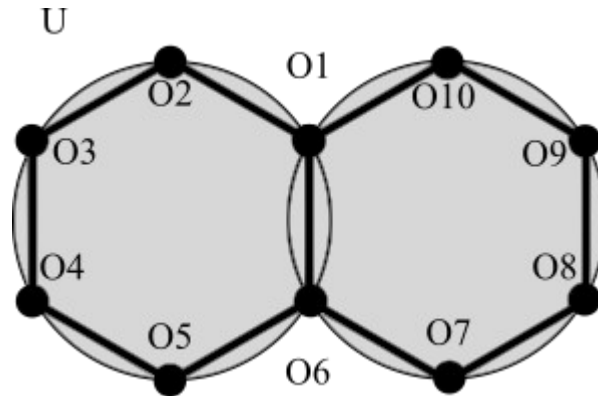


Рисунок 2.3.2.2 — Просте розбиття

За формування, наприклад, груп $O_1O_2O_3O_4O_5$ та $O_6O_7O_8O_9O_{10}$ охоплена площа буде визначатись площами кругів, обмежених колами, описаними навколо відповідних багатокутників, а потік даних в системі буде порівняно невеликим. Але такий підхід не буде ефективним у разі можливості відмови частини сенсорів. Відмова хоча б одного сенсора в даному випадку призведе до можливості існування тільки однієї TDOA-групи, простою чотирьох сенсорів і значної втрати в охоплюваній площі. Більш складний варіант зображено на рисунку 2.3.2.3.

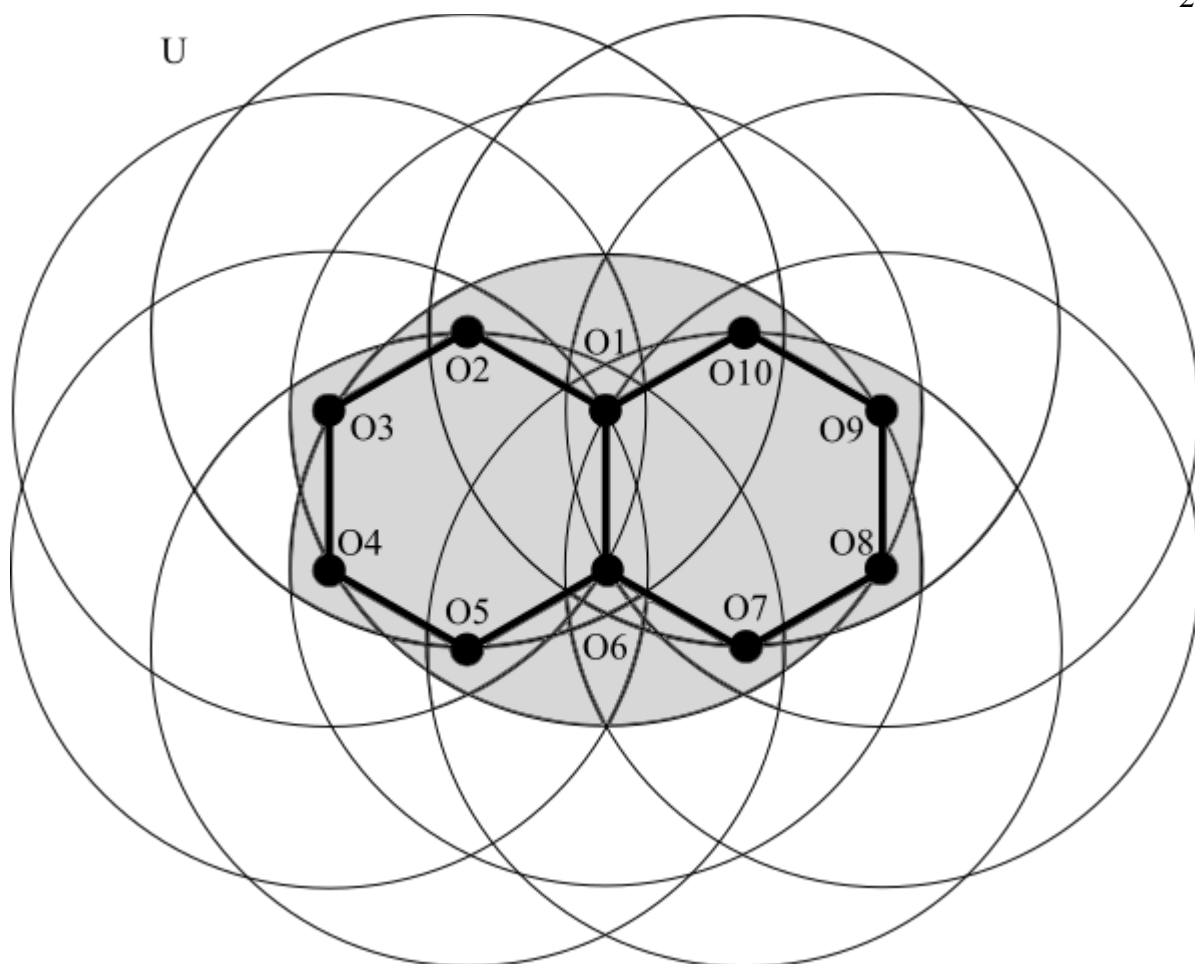


Рисунок 2.3.2.3 — Розбиття з перетином груп

На рисунку для наочності також наведені зони дії усіх сенсорів. В даному випадку охоплена площа є максимальною, але і TD OA-груп створено більше. Крім того, відмова будь-якого сенсора не призведе до значної втрати охоплюваної площі, але тільки за умови здатності системи до реконфігурації. Результати ж відмови двох сенсорів залежатимуть від того, які сенсори відмовили.

Таким чином, від правильності попереднього розміщення сенсорів на площині та наступного їх розбиття на TD OA-групи залежать охоплена мережею площа, відмовостійкість системи, а також об'єм та спрямованість потоку даних в рамках мережі.

2.3.3 Робота TDOA-контролера

Коли звукова подія відбувається, вона фіксується звуковими сенсорами. Контролери сенсорів формують спеціального вигляду інформаційні звіти для пов'язаних TDOA-груп, в яких обов'язково вказується як момент фіксації звуковим сенсором події, так і її інтенсивність. Ці звіти необхідні для успішного розпізнавання звукової події в межах однієї TDOA-групи. Після отримання звітів від усіх звукових сенсорів, що належать одній групі, позиція джерела звуку може бути обрахована за допомогою алгоритму TDOA. Алгоритм роботи контролера TDOA-групи наведений на рисунку 2.3.3.1.

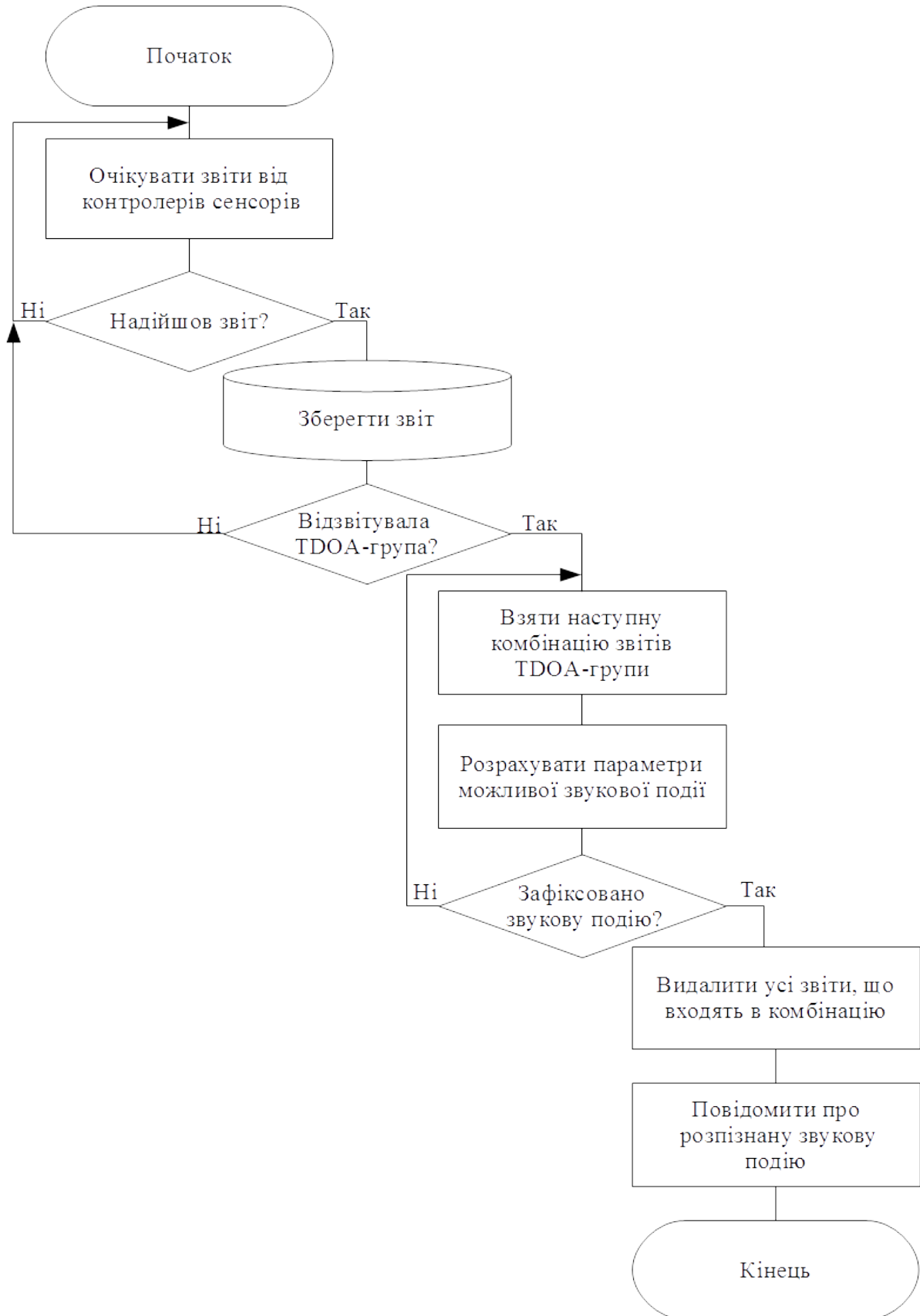


Рисунок 2.3.3.1 — Схема роботи контролера TDOA-групи

Спочатку контролер знаходиться в режимі очікування і не виконує ніякі дії до моменту надходження інформаційного звіту від пов'язаного контролера сенсора. Відразу після отримання звіт повинен бути збереженим у локальному сховищі на деякий заздалегідь визначений час. Далі виконується перевірка факту того, що відзвітувала уся пов'язана TDOA-група. Якщо група відзвітувала, то серед збережених інформаційних звітів наявні хоча б п'ять від різних контролерів. Оскільки чотирьох чи меншої кількості недостатньо для розрахування координат події, то в таких випадках контролер продовжує очікування. Може бути таке, що один або декілька контролерів уже встигли відзвітувати два або більше разів. Крім того, немає і не може бути гарантій щодо того, щоб кожен звукову подію обов'язково зафіксували усі сенсори. Інформаційний звіт про одну зафіксовану звукову подію може прийти до TDOA-групи від одного контролера сенсора нуль або один раз. Тому у разі, коли контролери сенсорів встигли відзвітувати декілька разів, послідовно перебираються усі можливі комбінації звітів, за якими можна розрахувати позицію джерела звуку. Після розрахування позиції відбувається перевірка того, чи могла звукова подія відбутись у відповідній точці та бути зафіксованою сенсорами з визначеною інтенсивністю. Якщо ні, то перебір продовжується далі до вичерпання можливих комбінацій. Якщо ж параметри звукової події розраховані правильно, то відповідні інформаційні звіти більше до уваги в майбутньому не приймаються, а контролер повідомляє про успішно розпізнану звукову подію. В тому випадку, коли усі можливі комбінації перебрані, а звукова подія не розпізнана, контролер ні про що не повідомляє, а переходить знову в режим очікування.

2.3.4 Потік даних

Існують декілька видів інформаційних повідомлень, обмін якими виконується в рамках системи. Схема їх потоку зображена на рисунку 2.3.4.1.

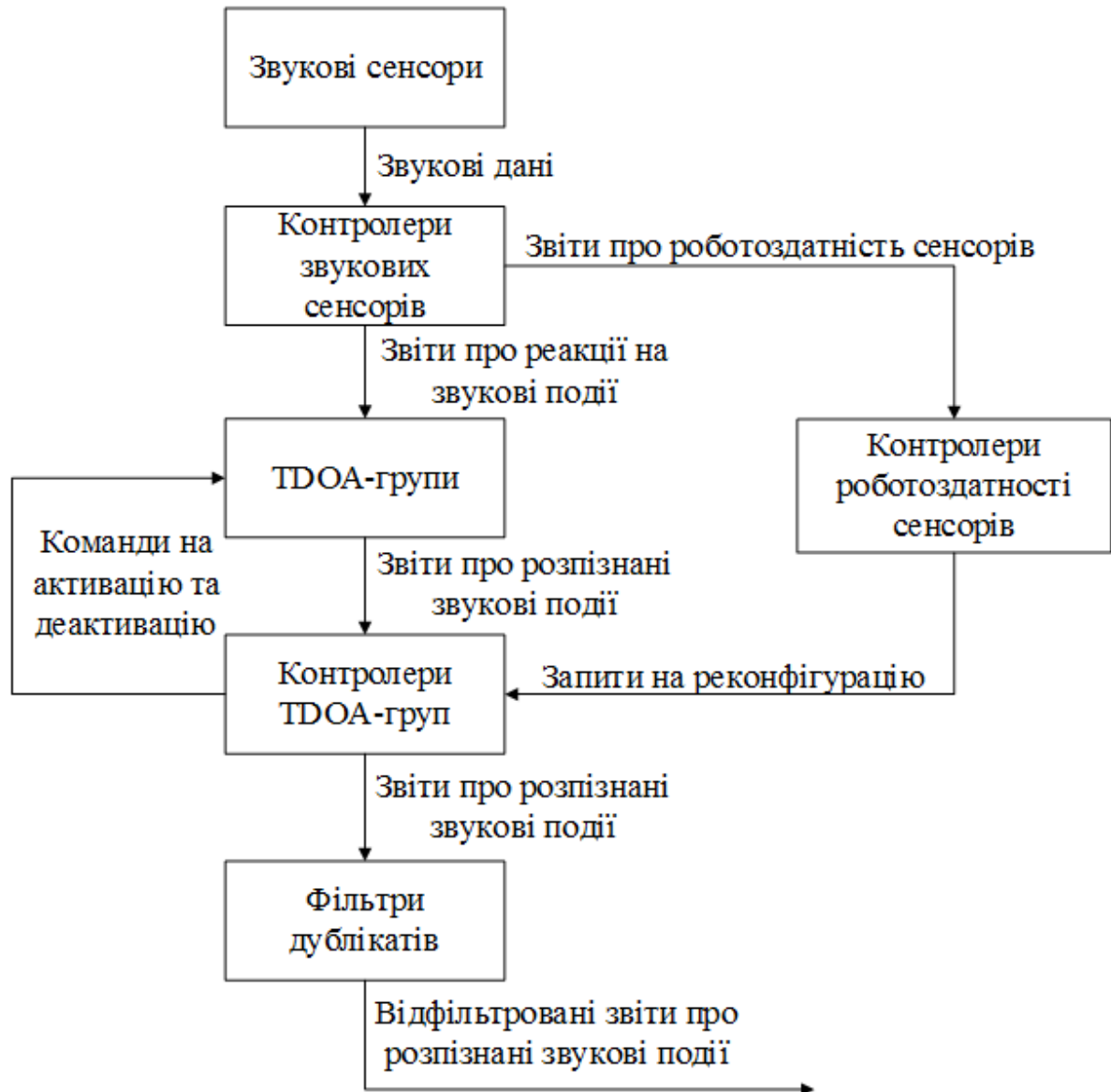


Рисунок 2.3.4.1 — Узагальнена схема обміну повідомленнями

Звукові сенсори працюють неперервно. Контролери звукових сенсорів фільтрують звукові дані на предмет перевищення заданого порогу інтенсивності. Якщо поріг інтенсивності не перевищений, то вважається, що звукової події не було і нічого не відбувається. У разі ж перевищення

визначеного порогу контролер запам'ятовує час фіксації події та її інтенсивність у локальному сховищі, після чого формує з них інформаційний звіт про реакцію на звукову подію, який і надсилає до пов'язаних TDOA-груп. Також він з деяким заданим проміжком часу виконує самодіагностику і повідомляє її результат до пов'язаного контролера роботоздатності.

Звіти про реакції на звукові події надходять до TDOA-груп. Результатом роботи TDOA-групи є звіт про розпізнану звукову подію, який включає в себе розраховані місце, інтенсивність та час виникнення події. Ці звіти обов'язково зберігаються контролерами TDOA-груп, після чого відправляються до фільтрів дублікатів з метою визначення повторень. Можливі ситуації, коли декілька груп зреагують на одну і ту саму звукову подію. За допомогою цього етапу можна обробити такі випадки, виходячи із наперед заданих допусків у часі (якщо декілька груп зреагували майже одночасно), координатах (декілька груп вираховували близькі позиції) та інтенсивностях (розраховані групами інтенсивності подій майже співпадають). Тоді можна вважати, що дані від кількох груп, які надійшли із деякою наперед заданою затримкою, збігаються із деякою наперед заданою точністю, то вони стосуються однієї звукової події.

Для відстеження ситуацій відмови звукових сенсорів існують контролери роботоздатності сенсорів. Вони збирають звіти про самодіагностику контролерів звукових сенсорів та приймають рішення про те, чи вважати відповідний сенсор та контролер роботоздатним. У разі, коли від контролера за деякий наперед визначений час не надійшло жодного звіту, він вважається таким, що вийшов з ладу і більше до уваги не приймається. В такому випадку починається процес реконфігурації системи. Це роблять контролери TDOA-груп.

2.3.5 Час реакції на подію

Часом реакції системи на звукову подію вважатимемо затримку між моментами виникнення цієї події та видачею відфільтрованого звіту про її розпізнавання. Тоді час реакції на подію буде мати в тому числі наступні складові:

1. Час надходження звукової хвилі до сенсорів.
2. Час передачі звіту про реакцію на звукову подію від контролерів сенсорних пристроїв до TDOA-груп.
3. Додатковий час очікування TDOA-групами звітів від усіх пов'язаних звукових сенсорів.
4. Час виконання алгоритму TDOA.
5. Час передачі звітів про розпізнані звукові події від TDOA-груп до фільтрів дублікатів.
6. Додатковий час очікування фільтрами дублікатів звітів про розпізнані звукові події.

Узагальнена схема затримок зображена на рисунку 2.3.5.1.

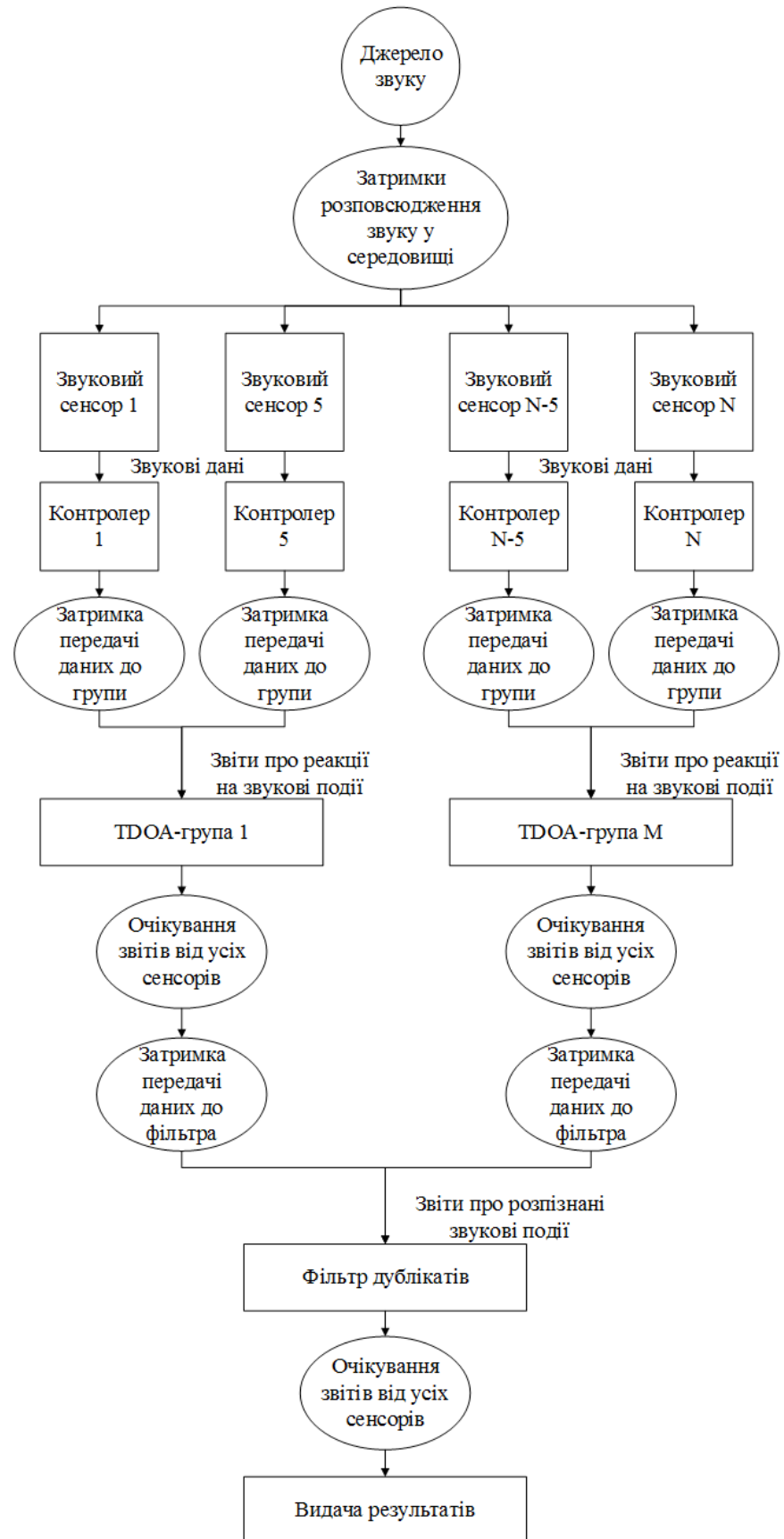


Рисунок 2.3.5.1 — Узагальнена схема затримок

Час надходження звукової хвилі до сенсорів є порівняно невеликим. В цей же час він є достатньо важливим, адже затримка отримання даних з сенсора хоча б в одну мілісекунду може дати похибку в координатах на 0,34 метра, що може бути важливим в разі спостереження за порівняно невеликими територіями.

Найбільший вплив дають затримки передачі даних по мережі, але в реальних умовах їх позбутися неможливо, особливо у випадку бездротового з'єднання.

Важливим є також час очікування TDOA-групами звітів від усіх пов'язаних звукових сенсорів, тобто час, протягом якого зберігаються інформаційні повідомлення від контролерів до їх видалення. Зниження квоти цього часу може призвести до неможливості розпізнавання звукових подій при поганому мережному з'єднанні між контролерами звукових сенсорів та TDOA-групами. Завищення — може не дати можливість розпізнати події, що відбулися з достатньо малим проміжком часу між ними та збільшує час реакції системи.

Час очікування фільтрами дублікатів звітів про розпізнані звукові події від пов'язаних TDOA-груп також треба приймати до уваги. Зниження квоти цього часу може призвести до помилкового розпізнавання однієї звукової події як декількох. Завищення ж збільшує час реакції системи.

Час виконання алгоритму TDOA в цілому є менш важливим, оскільки саме вирішення системи рівнянь виконується за визначений час, але містить у собі складову перебору можливих комбінацій звітів від сенсорів, що може бути суттєвим в разі наявності шумів та завад, а також за такої ситуації, коли система працює в середовищі з багатьма часто спрацьовуючими джерелами звуку.

2.4 Висновки

Для визначення просторових координат об'єктів пропонується використовувати алгоритм TDOA, що зводиться до вирішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь. На отримання вихідних даних для алгоритму впливають характеристики використовуваних звукових сенсорів. Охоплена площа, розпізнавання звукових подій на якій є можливим, залежить від розміщення на ній сенсорів. Можливість відмови сенсорів у процесі роботи призводить до необхідності динамічної реконфігурації системи в таких випадках. Для успішного розпізнавання звукових подій недостатньо лише часу їх фіксації сенсорами, а додатково потрібна зафіксована інтенсивність. Звіти про розпізнані звукові події необхідно фільтрувати на предмет дублювання. Час реакції системи на подію залежить як від неконтрольованої складової (час передачі по мережі), так і параметризованої частини (час очікування TDOA-групи та вихідного фільтра).

3 Імітаційна модель та алгоритми

3.1 Загальний опис

У попередньому розділі описано підхід до відслідковування координат об'єктів за допомогою сенсорних мереж та алгоритму TDOA, а також загальну архітектуру пропонованої системи і потоки даних в її межах. Імітаційну модель системи побудовано з використанням мови програмування загального призначення Python 3.5. Параметрами моделі описані нижче.

1. Координати звукових сенсорів на площині.
2. Мінімальні інтенсивності звукових подій, що фіксуються сенсорами.
3. Координати джерел звуку на площині.
4. Часові інтервали, з якими джерела звуку генерують звукові події.
5. Інтенсивності генерованих подій.
6. Швидкість розповсюдження звуку.
7. Інтервали можливих затримок передачі даних між контролерами сенсорних пристроїв та єдиним сервером TDOA-груп.
8. Інтервали можливих затримок передачі даних між TDOA-групами та єдиним фільтром дублікатів.
9. Додатковий час очікування TDOA-групами звітів від усіх пов'язаних звукових сенсорів.
10. Максимально допустима похибка розрахованих за даними сенсорів TDOA-групи інтенсивностей джерела можливої звукової події.
11. Додатковий час очікування фільтром дублікатів звітів про розпізнані звукові події.

12. Максимальна можлива похибка в координатах, за якої фільтр дублікатів розпізнає декілька звітів про розпізнані звукові події як такі, що стосуються однієї події.

Розміщення усіх звукових сенсорів на попередньо заданих у параметрах фіксованих позиціях є важливим. Оскільки вхідними даними алгоритму TDOA є в тому числі позиції сенсорів, виникає необхідність стежити за ними. Хоча їх можна відслідкувати, наприклад, за допомогою інерціальних навігаційних систем, це призвело б до надмірного ускладнення сенсорних пристроїв, а тому підвищення їх вартості та зниження відмовостійкості та часу роботи. Тому позиції звукових сенсорів вважаємо фіксованими і під час роботи моделі не змінюємо.

Мінімальна інтенсивність звукової події, що сприймається сенсором, також є потрібною. Інакше сенсор реагував би на шум та інші фонові звуки, які до справжніх звукових подій відношення не мають. Якщо у один момент часу на звуковий сенсор надходять декілька звукових подій, то він реагує тільки на найбільш інтенсивну з них. Інтенсивність же події спадає квадратично із віддаленням від її джерела.

Джерела звуку можуть бути як рухомими, так і нерухомими, на відміну від звукових сенсорів. Вони генерують звукові події кожне з заданим інтервалом часу. Таким чином, сигнали від декількох джерел звуку можуть перекриватись, співпадати, надходити до сенсорів з малими проміжками часу.

Середовище розповсюдження звуку є однорідним. Генеровані звукові події є звуковими хвилями з фронтом сферичної форми. Сенсори вважаються ненаправленими.

Єдині сервери TDOA-груп та фільтра дублікатів імітують клієнт-серверну архітектуру системи, адже поведінка і відмовостійкість однорангової системи з динамічним визначенням модулів, відповідальних

за різні операції, в умовах обмеженості обчислювальних та інших ресурсів, а також наявності шумів і завад заслуговують окремого дослідження. При цьому деякі особливості роботи системи, такі як розмір даних, що передаються, а також якість мережного з'єднання зведені до інтервалів можливих затримок передачі даних.

Кожний звуковий сенсор може знаходитись у стані «роботоздатний» або «нероботоздатний», про зміну якого відразу стає відомо контролеру цього сенсора. Ситуації обриву з'єднання між сенсором і його контролером не розглядаються. В межах TDOA-групи сенсор може перестати вважатись роботоздатним як у випадку прямого повідомлення про це контролером, так і за відсутності протягом деякого часу звітів про роботоздатність від його контролера. Це імітує ситуації обриву мережного з'єднання між сенсором та групою, а також фізичного виходу з ладу обладнання.

3.2 Робота моделі

На рисунку 3.2.1 зображено діаграму IDEF0 роботи моделі. На ній укрупнено наведено основні входи, виходи та правила роботи моделі.

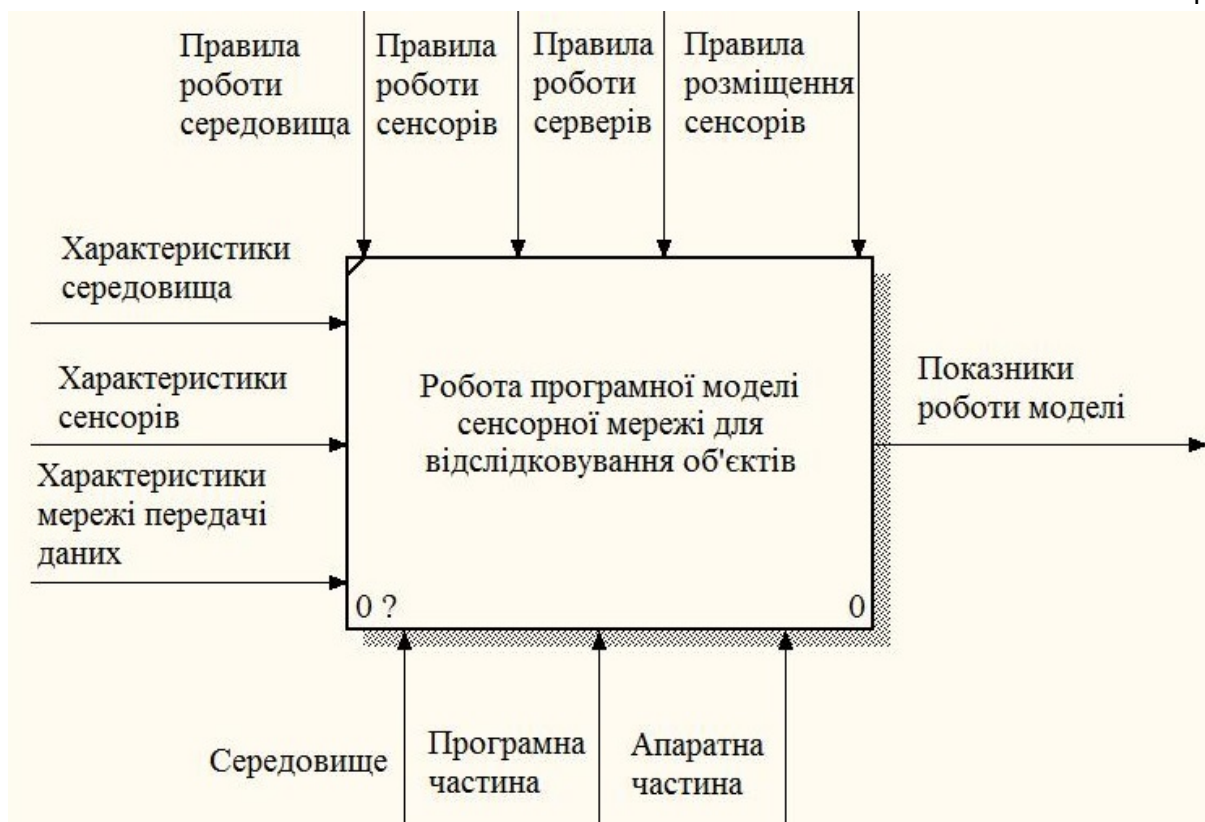


Рисунок 3.2.1 — Укрупнена діаграма роботи моделі

Входами моделі є різного роду характеристики та налаштування. До їх числа входять характеристики середовища (швидкість звуку, позиції та інтенсивності джерел звуку), сенсорів (позиції та чутливість) та мережі передачі даних (затримки передачі між різними вузлами мережі). Основними виконавцями роботи є середовище розповсюдження звуку, програмна та апаратна частини модельованої мережі. Вони керуються своїми відповідними правилами роботи. Виходом моделі є показники її роботи, як кількість звукових подій, що відбулися, загальна кількість реакцій на події, кількість правильних реакцій на події тощо.

Більш детальна діаграма роботи моделі зображена на рисунку 3.2.2. Це перший рівень декомпозиції попередньої діаграми, на якому наведені основні роботи, з яких складається діяльність моделі.

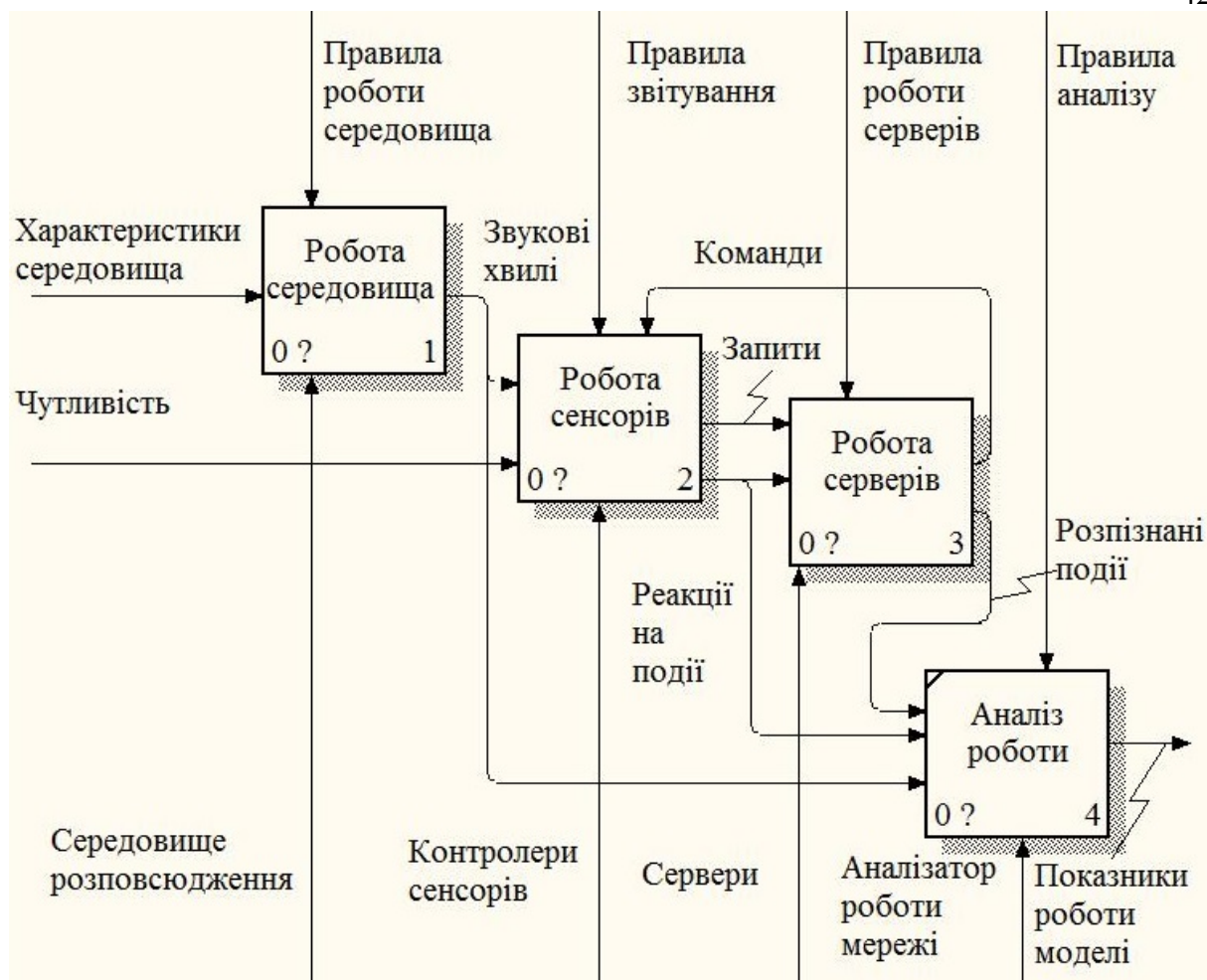


Рисунок 3.2.2 — Діаграма роботи моделі

Під роботою середовища розуміється робота всього, що оточує сенсорну мережу, але не входить до її складу, в тому числі джерел звуку, середовища розповсюдження звуку, звукових хвиль. Найголовнішим у цьому є звукові події, які після генерації повинні надійти або не надійти до сенсорів. Сенсорні пристрої фільтрують потік звукових даних і реагують на отримані події. Інформаційні звіти про реакції на звукові події відправляються до пов'язаних серверів. Також сенсори можуть обмінюватись із серверами службовими даними. Сервери обробляють реакції на звукові події. Вони розпізнають джерела звуку та можуть видавати команди сенсорам. Після того, як модель відпрацює, її робота підлягає подальшому аналізу.

Діаграма роботи середовища розповсюдження звуку зображена на рисунку 3.2.3. Вона представляє собою подальшу декомпозицію роботи середовища з діаграми 3.2.2.

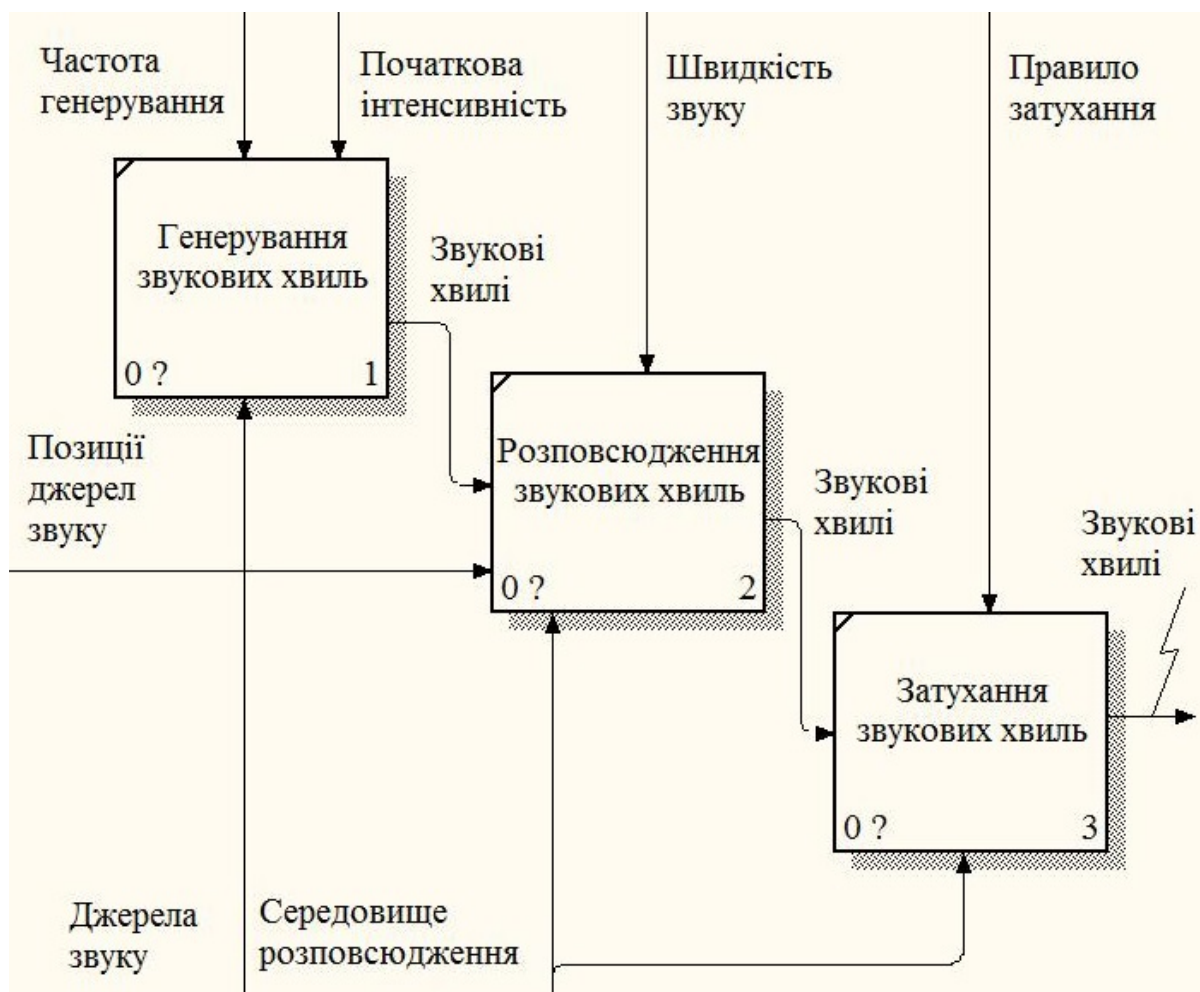


Рисунок 3.2.3 — Діаграма роботи середовища розповсюдження звуку

Джерела звуку генерують звукові хвилі. Інтервали між двома послідовними генераціями хвиль задаються окремо для кожного джерела. Кожне джерело має свої координати, причому вони можуть співпадати для різних джерел. Початкові інтенсивності хвиль також задаються окремо. Усі генеровані хвилі характеризуються сферичним фронтом, тобто розповсюджуються рівномірно у всі боки. Середовище розповсюдження, відштовхуючись від координат джерел, які вважаються початковими координатами хвиль, а також знаючи швидкість звуку, розповсюджує їх.

Знаючи формулу затухання хвиль, воно поступово зменшує їх інтенсивність із віддаленням фронту від точки походження з часом. Модель дозволяє своє розширення у плані введення нових типів хвиль в подальшому, оскільки принципового обмеження на це немає. Щоб додати новий тип достатньо буде тільки змінити формулу затухання. Перевірку на те, чи досягла хвиля якогось сенсора, змінювати не потрібно.

Діаграма роботи сенсорів наведена на рисунку 3.2.4. Вона представляє собою більш детальну декомпозицію роботи сенсорів з діаграми 3.2.2.

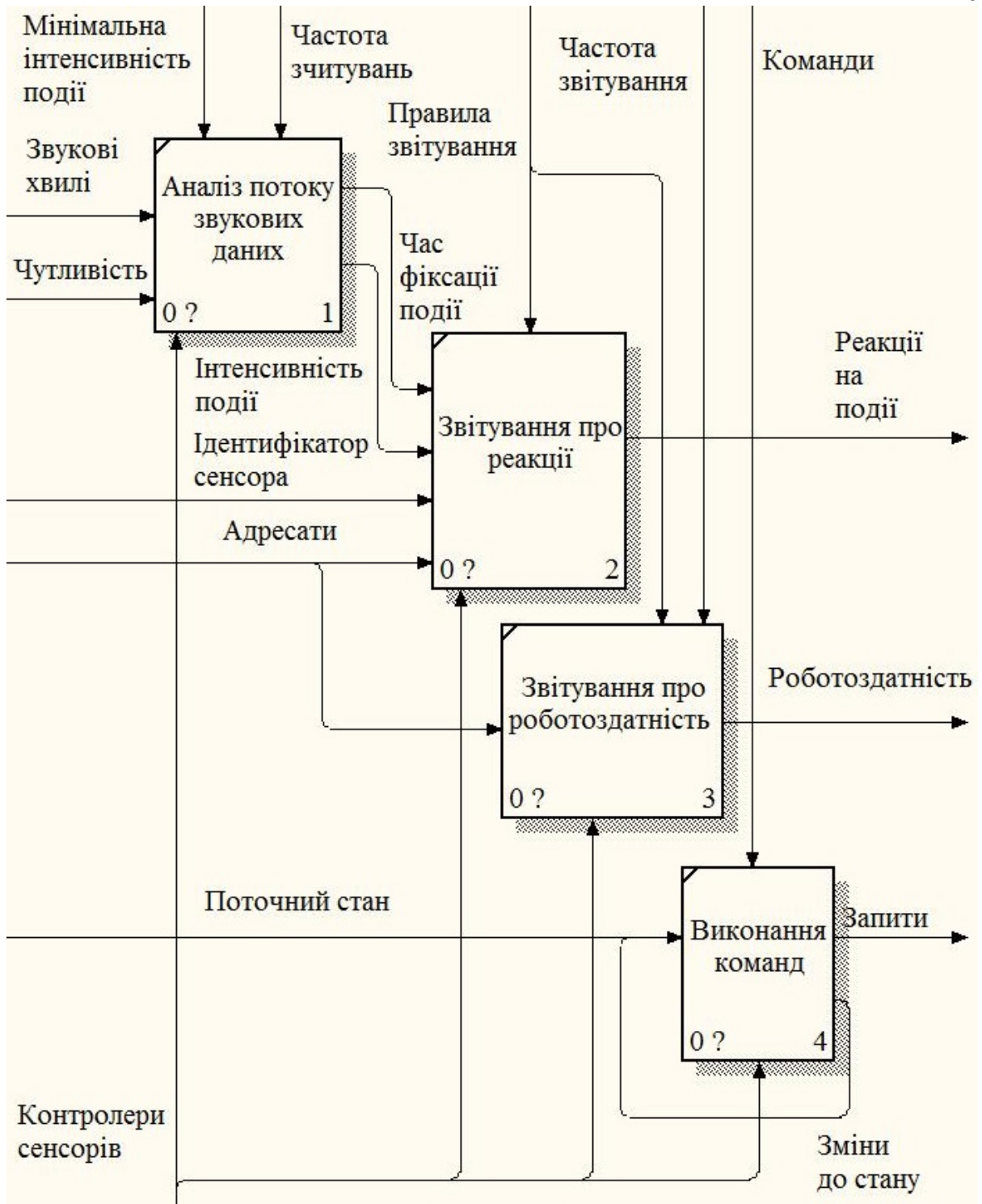


Рисунок 3.2.4 — Діаграма роботи сенсорів

Контролери сенсорів з деякою попередньо заданою частотою зчитують дані зі своїх сенсорів. Коли зафіксована інтенсивність перевищує деякий попередньо заданий поріг, це вважається звуковою подією.

Запам'ятавши час фіксації події та її інтенсивність, а також знаючи власний ідентифікатор, контролер може відзвітувати про реакцію на звукову подію списку адресатів. З деякою частотою він також повідомляє про свою роботоздатність чи нероботоздатність іншому списку адресатів. Якщо контролер отримує якісь команди, він може їх виконати та змінити свій стан (налаштування, запам'ятовані реакції) або виконати потрібний запит.

Діаграма роботи серверів зображена на рисунку 3.2.5. Вона пояснює взаємодію різних об'єктів серверної частини моделі.

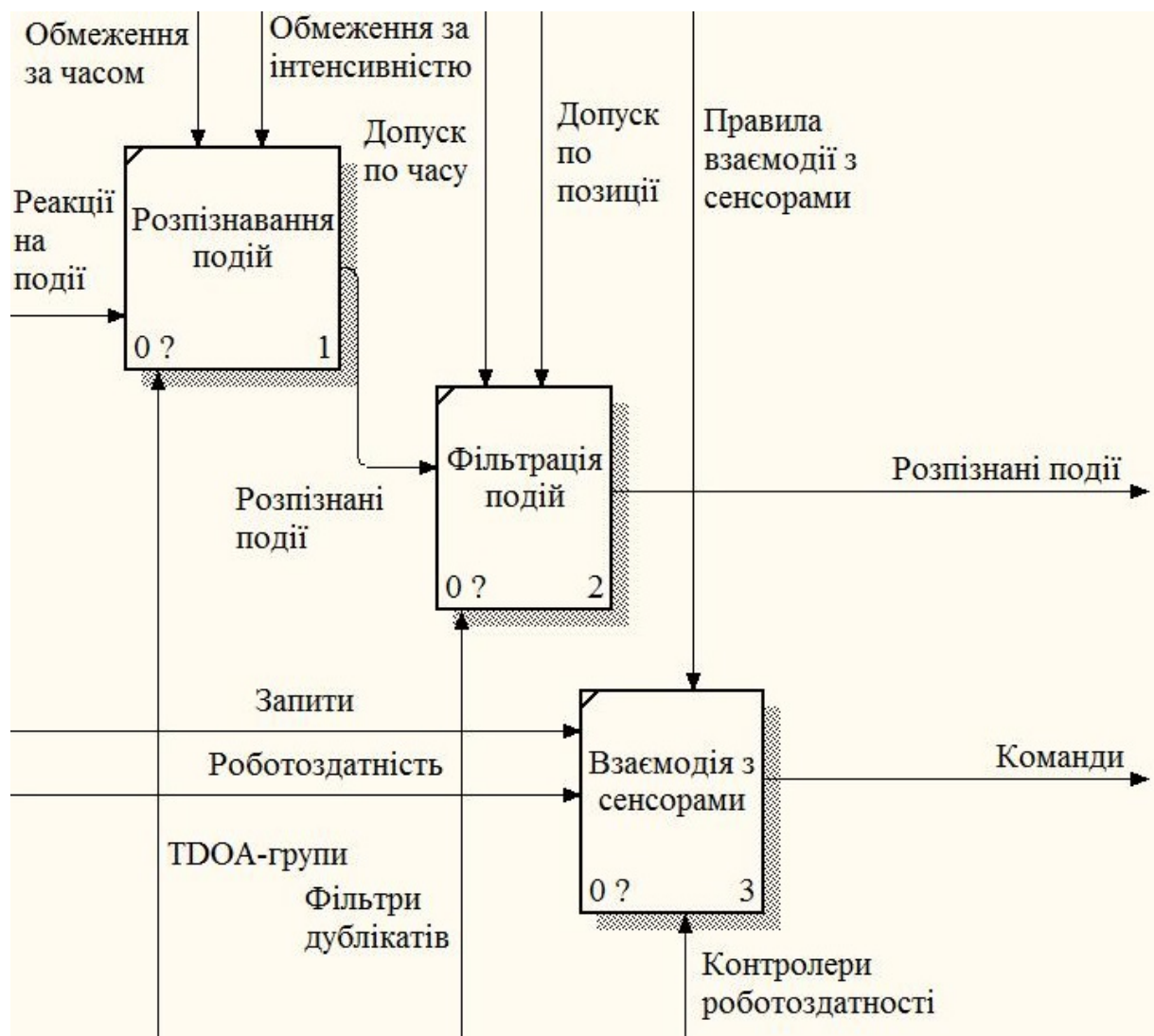


Рисунок 3.2.5 — Діаграма роботи серверів

Сервери TDOA-груп отримують від підконтрольних сенсорів інформаційні звіти про реакції на звукові події. Знаючи максимальний час, протягом якого зберігаються ці звіти, вони можуть розраховувати позиції джерел звуку, з урахуванням максимально допустимої похибки розрахованої інтенсивності джерела. Далі дані від різних груп фільтруються на предмет виявлення дублікатів за позицією та часом. В разі відмови деяких сенсорів контролери роботодатності можуть переформувати TDOA-групи та змінити налаштування інших.

Робота модуля аналізу роботи моделі зображена на рисунку 3.2.6. З неї видно елементи статистики, якими оперує модель.

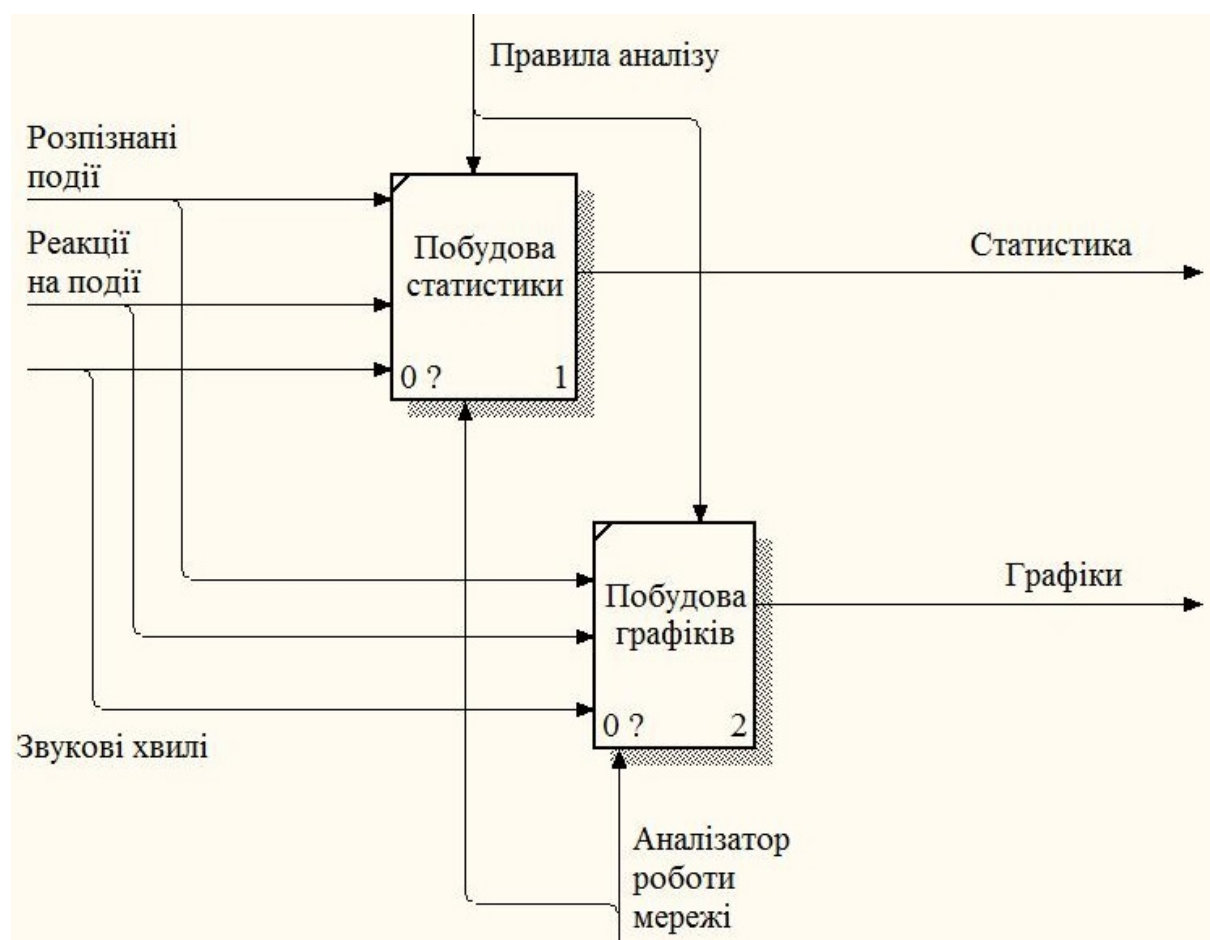


Рисунок 3.2.6 — Робота аналізатора

Можливості вбудованого аналізатора роботи моделі зводяться до побудови статистики її роботи, а також відповідних графіків, в яких наявні

в тому числі загальна кількість розпізнаних подій, кількість правильно розпізнаних подій, позиції сенсорів, джерел тощо.

Загальна схема виконуваних моделлю робіт (функцій) зображена на рисунку 3.2.7. Вона підводить підсумок наведеним раніше діаграмам.

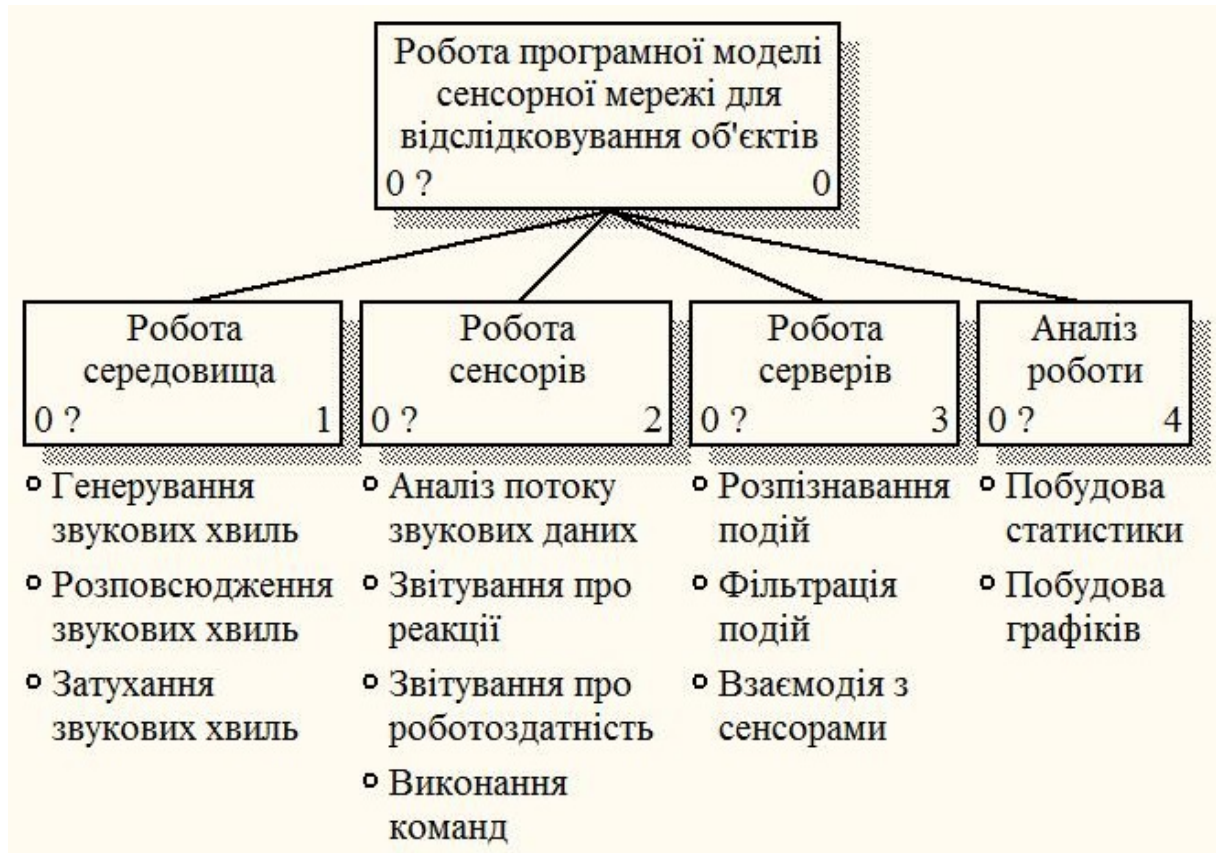


Рисунок 3.2.7 — Загальна схема функцій моделі

До неї входять усі основні дії, пов'язані з генеруванням і подальшим розповсюдженням звукових хвиль, аналіз потоку сенсорних даних і розпізнавання подій, а також отримання і аналіз статистичних даних.

3.3 Потік даних в моделі

Процес перетворення згенерованих звукових хвиль у розпізнані події зображений на рисунку 3.3.1.

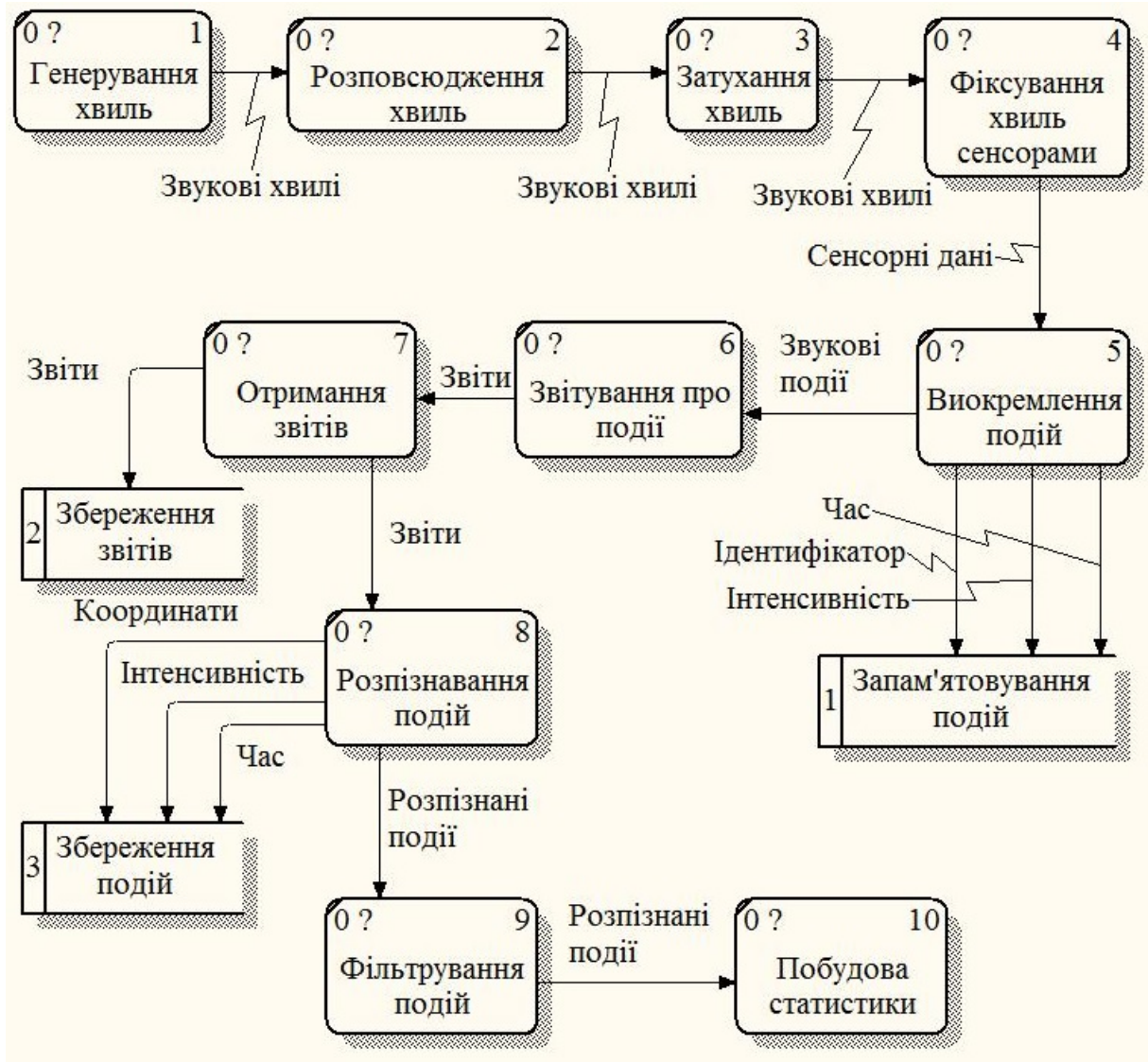


Рисунок 3.3.1 — Потік даних в моделі

Хоча модель також імітує мережне з'єднання між різними обчислювальними пристроями, передача даних по мережі не включена окремо до складу діаграм як така, що не має прямого відношення до розпізнавання звукових подій. Сам процес розпізнавання наведений на рисунку 3.3.2.

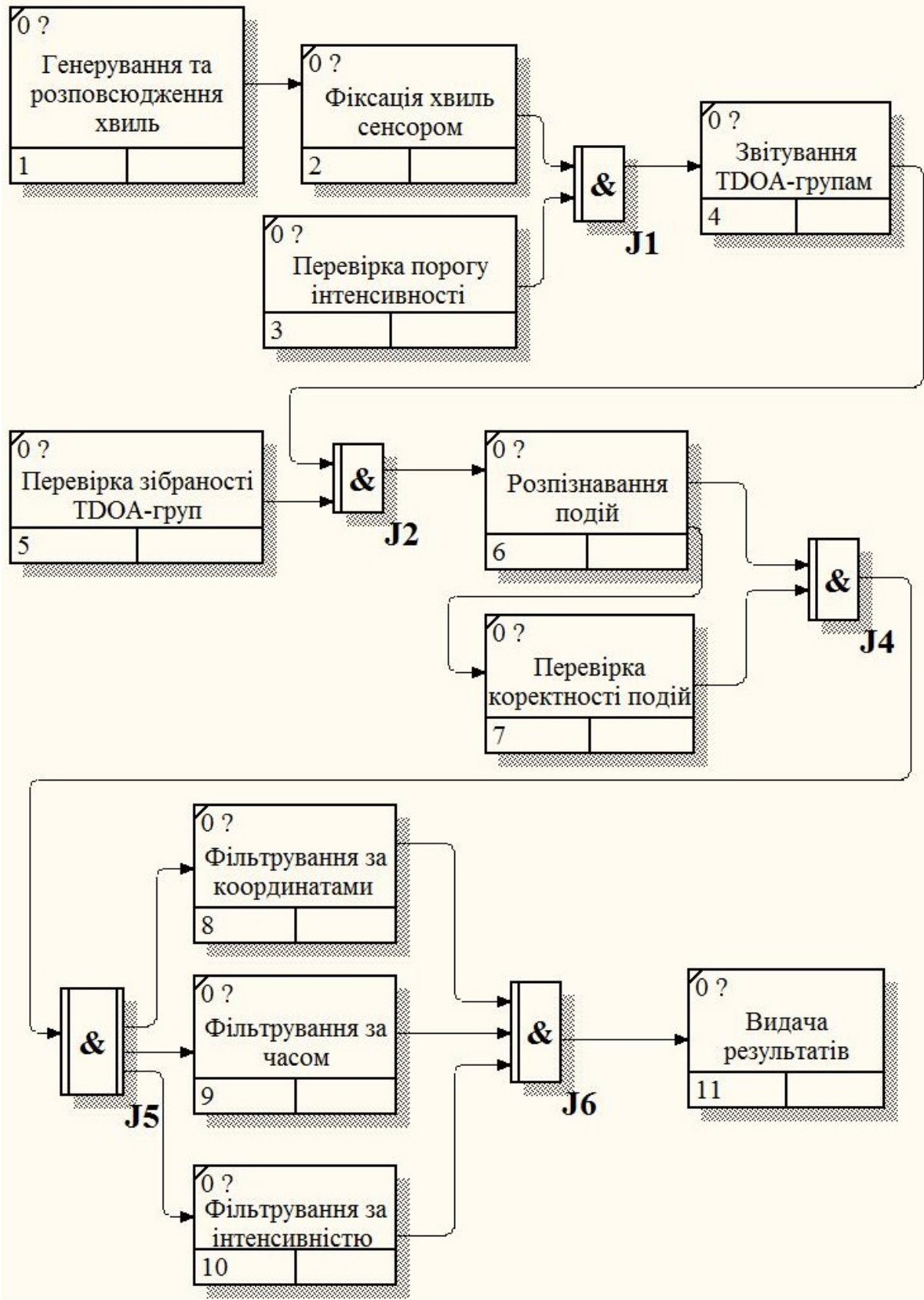


Рисунок 3.3.2 — Процес розпізнавання подій

На рисунку 3.3.3 зображено діаграму «сутність-зв'язок» найбільш значущої частини моделі. До неї включено сенсорну та серверну частини, але без мережної.

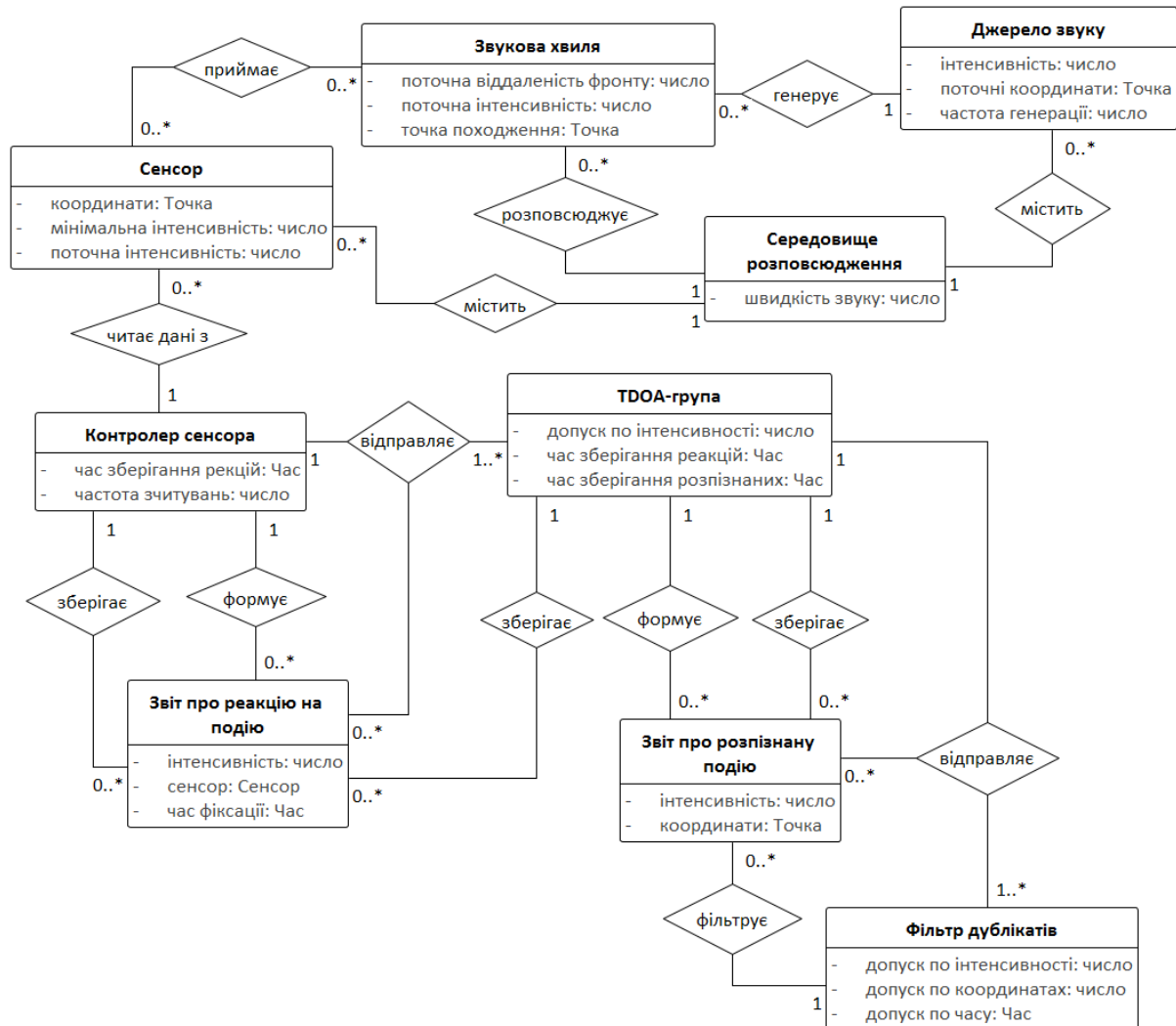


Рисунок 3.3.3 — Діаграма «сутність-зв'язок» моделі

Застосування принципів об'єктно-орієнтованого проектування SOLID дозволило втілити наведену схему моделі у програмному коді із внесенням лише мінімальних змін до розроблених сутностей. Також архітектура побудованої програмної системи є розширюваною, завдяки чому функціональність моделі можна в подальшому ускладнювати через додання нових модулів чи зміни поведінки існуючих.

3.4 Висновки

В даному розділі описано програмну модель, що імітує роботу сенсорної мережі та її зв'язок з серверами. Модель складається з компонентів, найбільш значущими з яких є середовище розповсюдження звуку, апаратні засоби, програмні засоби та мережа передачі даних. Середовище розповсюдження відповідальне за просування фронту звукової хвилі у трьохвимірному просторі згідно заданих параметрів. Апаратні засоби включають в себе власне сенсори та узагальнену апаратну платформу, на якій працюють програмні засоби. Програмні засоби розділяються на контролери сенсорів та серверне програмне забезпечення. Мережу передачі даних складають мережні адаптери з категорії апаратних засобів, що пов'язані між собою середовищем передачі з заданими затримками. Команди на передачу та прийом даних віддають мережні контролери з категорії програмних засобів.

Побудована модель дозволяє досліджувати роботу сенсорних мереж у різних умовах за допомогою зміни відповідних налаштувань, а також аналізувати різні показники якості поведінки системи, включаючи точність розпізнавання, час реакції на подію та інші.

4 Експериментальне дослідження моделі

В попередньому розділі описано програмну модель, що використовувалась для імітації роботи сенсорної мережі. В цьому розділі описано дослідження роботи даної мережі в різних режимах.

4.1 Фіксовані джерела, малі інтервали генерації сигналів

Проводились запуски моделі із різними наборами параметрів, при чому положення звукових сенсорів залишались постійними. Число запусків моделі для кожного набору параметрів становило 100 разів. Кожне джерело звуку генерувало по 15 подій. Також кожне джерело звуку мало власний постійний інтервал часу між генераціями звукових подій, і їх інтенсивність, що задавались випадково для всіх джерел в заданих межах. Перевірялась поведінка системи при зміні числа джерел звуку, а також меж інтервалів часу між генераціями звукових подій та їх інтенсивності. Швидкість звуку залишалась постійною і становила 0.3409 одиниць швидкості.

На рисунках 4.1.1.1 — 4.1.1.2 зображено поведінку системи при збільшенні числа джерел звуку, що генерують події близької інтенсивності (в межах $[100, 200)$ одиниць інтенсивності) з близькими інтервалами генерації (в межах $[100, 150)$ одиниць часу). Правильною вважалась реакція на подію, якщо розраховані координати X та Y джерела звуку відрізнялись від істинних не більше, ніж на 0.5 одиниць довжини.

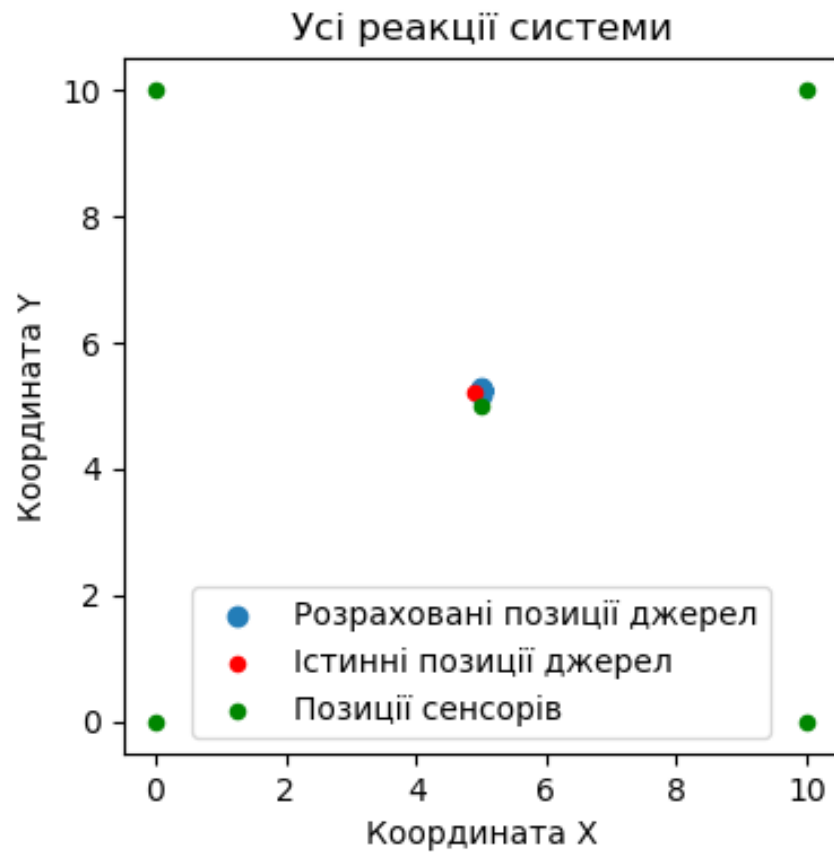


Рисунок 4.1.1 — Одне джерело, усі реакції

Це тривіальний випадок. В найпростішому режимі роботи сигнали від єдиного джерела звуку генеруються із затримками, великими порівняно зі швидкістю поширення звуку. Немає інших джерел, тому і розпізнавання позиції походження звукової хвилі не стикається з жодними складнощами.

Реакції системи з точністю до 0.5 одиниць довжини

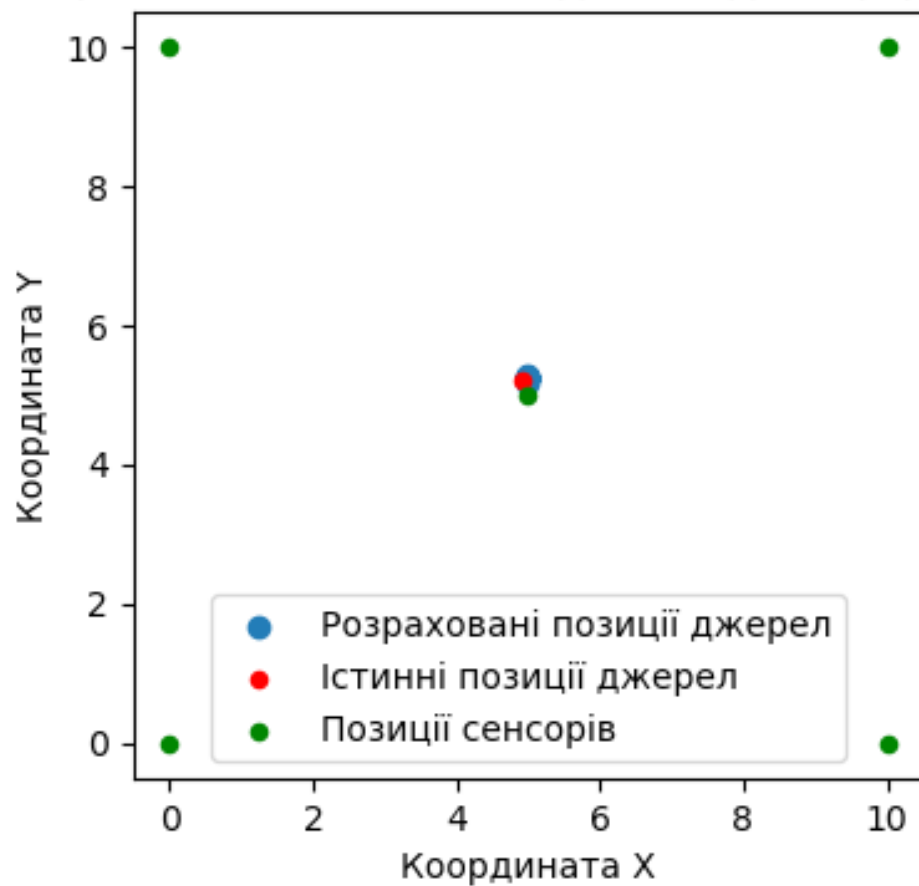


Рисунок 4.1.2 — Одне джерело, правильні реакції

Позиція джерела правильно розпізнана у всіх випадках. За таких умов похибка у обчислених координатах мінімальна і залежить виключно від затримки зчитування даних з сенсора.

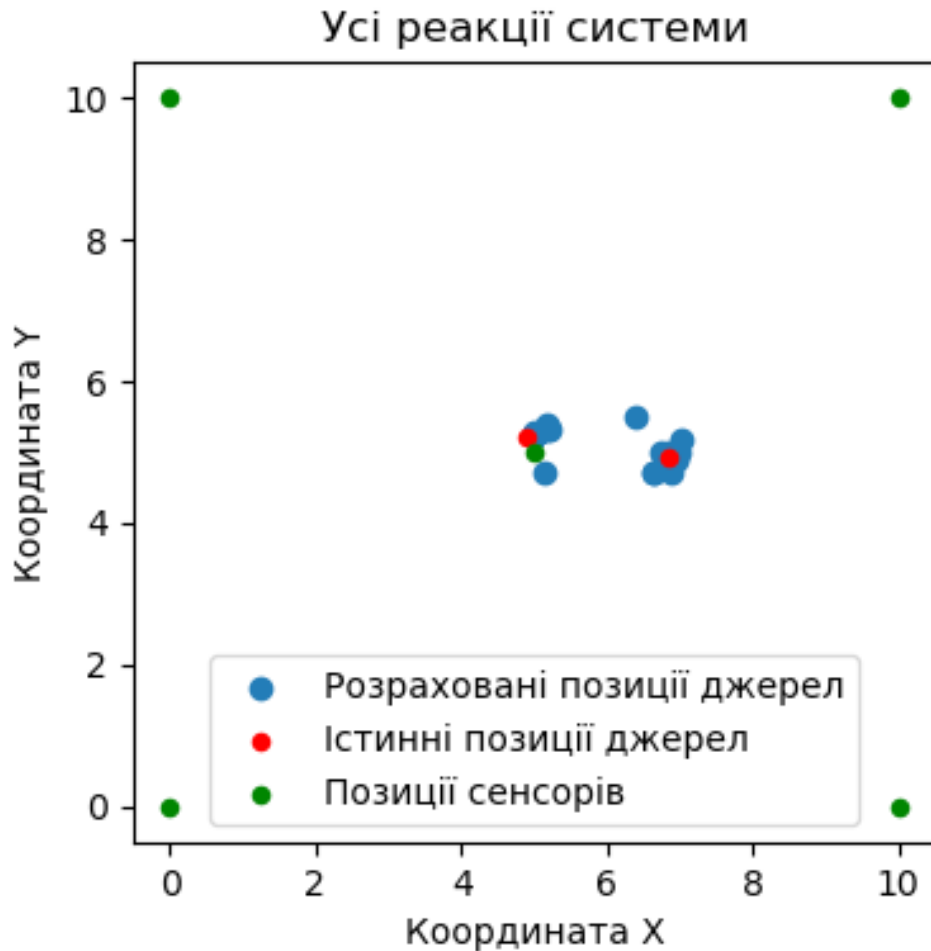


Рисунок 4.1.3 — Два джерела, усі реакції

Цей випадок дещо складніший за попередній, але все ще достатньо простий. В разі наявності двох джерел звуку, можливим є накладання сигналів від них. Тобто, може виникнути ситуація, коли TDOA-група, приступаючи до обчислення координат джерела, буде мати декілька звітів від одного сенсора. У випадку ж надходження декількох хвиль на сенсор одночасно, контролер не зможе їх виокремити і вважатиме, що зафіксована єдина подія.

Реакції системи з точністю до 0.5 одиниць довжини

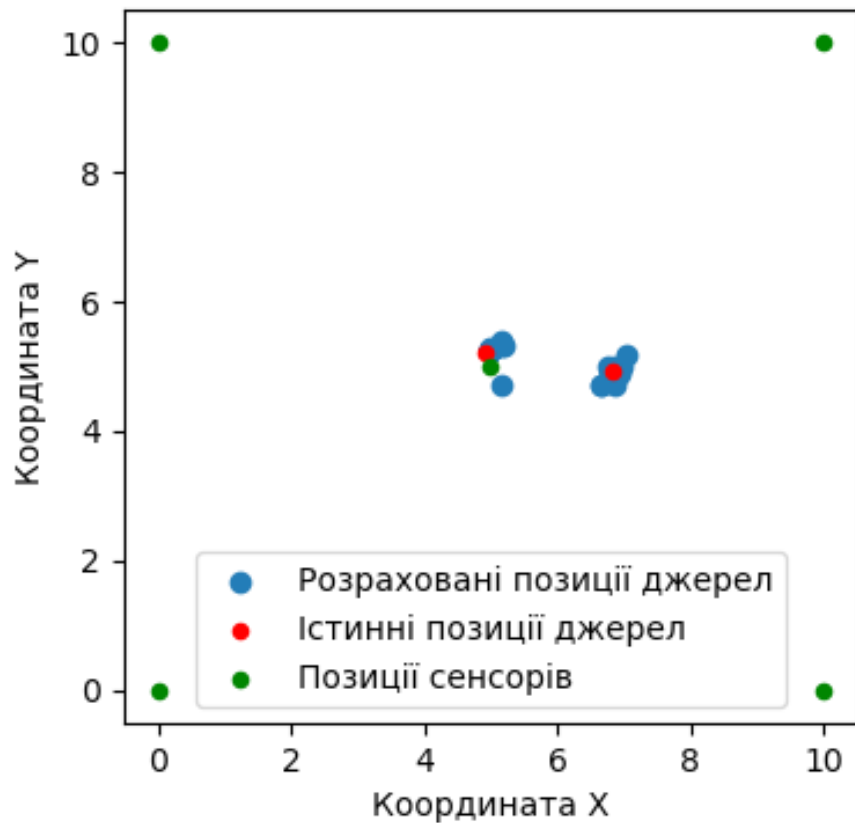


Рисунок 4.1.4 — Два джерела, правильні реакції

Незважаючи на наявність всього двох джерел звуку, конфлікти все ж виникають. Тому на цьому рисунку відмічено менше розрахованих позицій джерел, ніж на попередньому. Але таких конфліктів дуже мало, тому і якість роботи мережі впала не сильно.

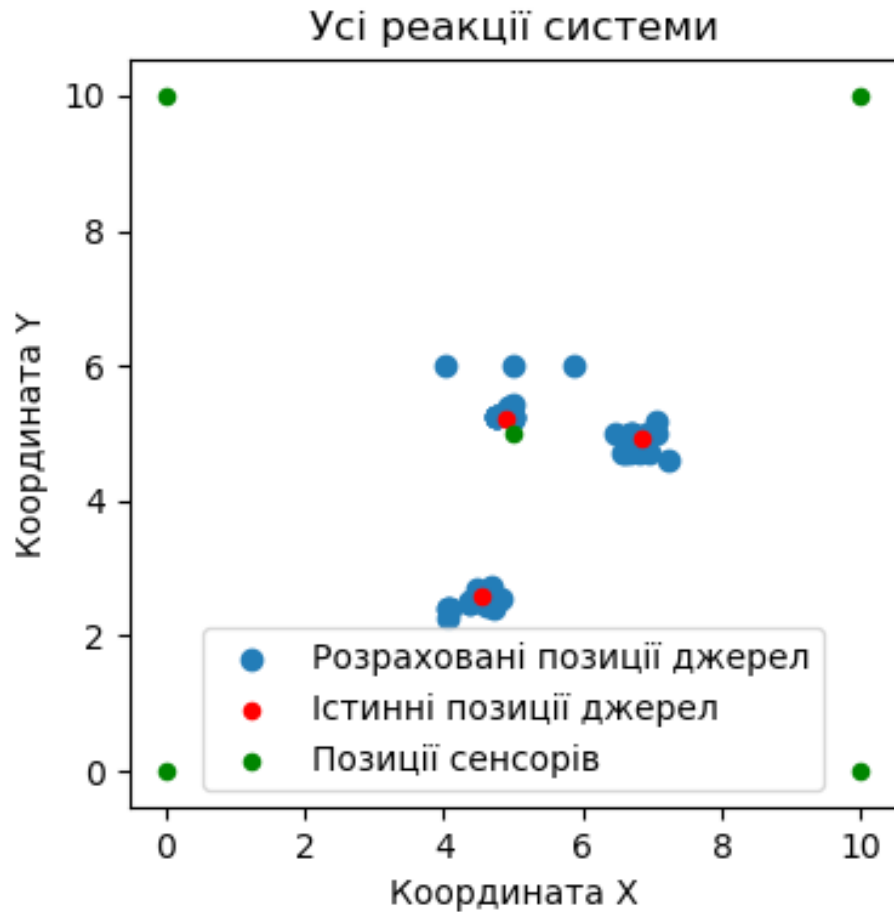


Рисунок 4.1.5 — Три джерела, усі реакції

За такої конфігурації імовірність конфліктів зростає, але сигнали від різних джерел все ще не сильно заважають один одному. Точність розпізнавання координат джерела, що знаходиться найближче до центрального сенсора вища, оскільки його сигнали фіксуються майже відразу і мають найвищу інтенсивність на центральному сенсорі, тому мережі його просто виокремити.

Реакції системи з точністю до 0.5 одиниць довжини

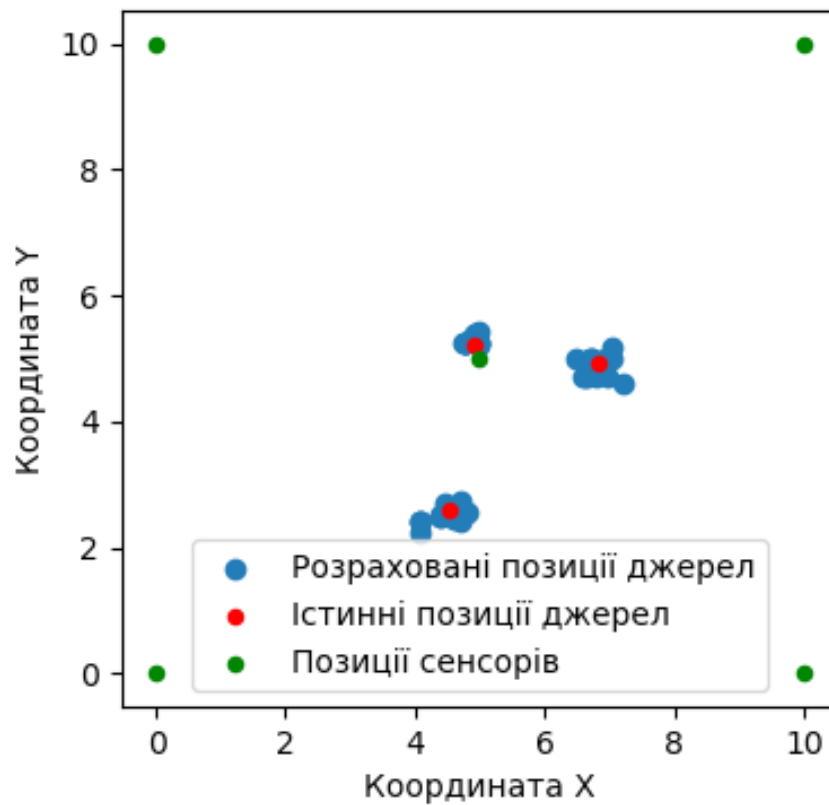


Рисунок 4.1.6 — Три джерела, правильні реакції

Все ще майже всі реакції системи вважаються правильними. На графіку відсутні всього декілька реакцій з недопустимою похибкою. Хоча може здатись, що для віддалених від центра джерел розпізнано більше подій, це є результатом візуального накладання точок від різних реакцій меншої точності.

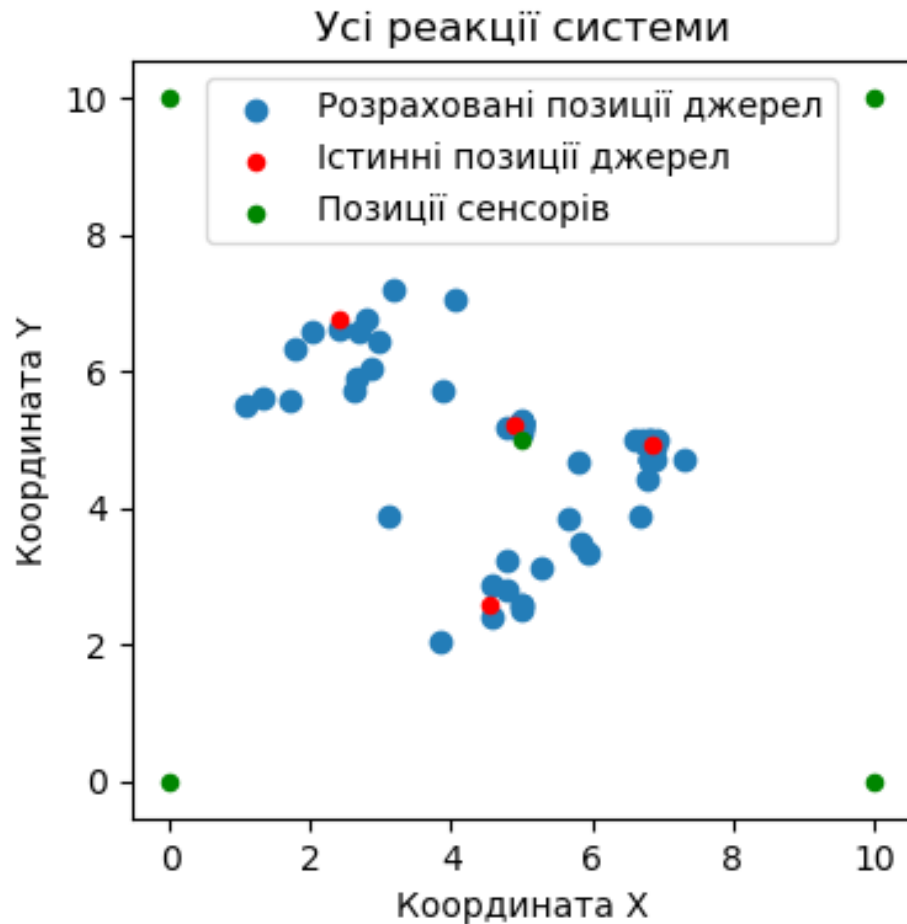


Рисунок 4.1.7 — Чотири джерела, усі реакції

Джерел більше, тому і рівень їх взаємного впливу вищий. Звідси і наявність реакцій, помітно віддалених від справжніх джерел. Взявши комбінацію звітів, що стосуються подій від різних реальних джерел, система розраховує позицію та можливу інтенсивність віртуального, після чого приходить до висновку, що сигнал від такого джерела міг бути зафіксованим на відповідних сенсорах з відповідними інтенсивностями.

Реакції системи з точністю до 0.5 одиниць довжини

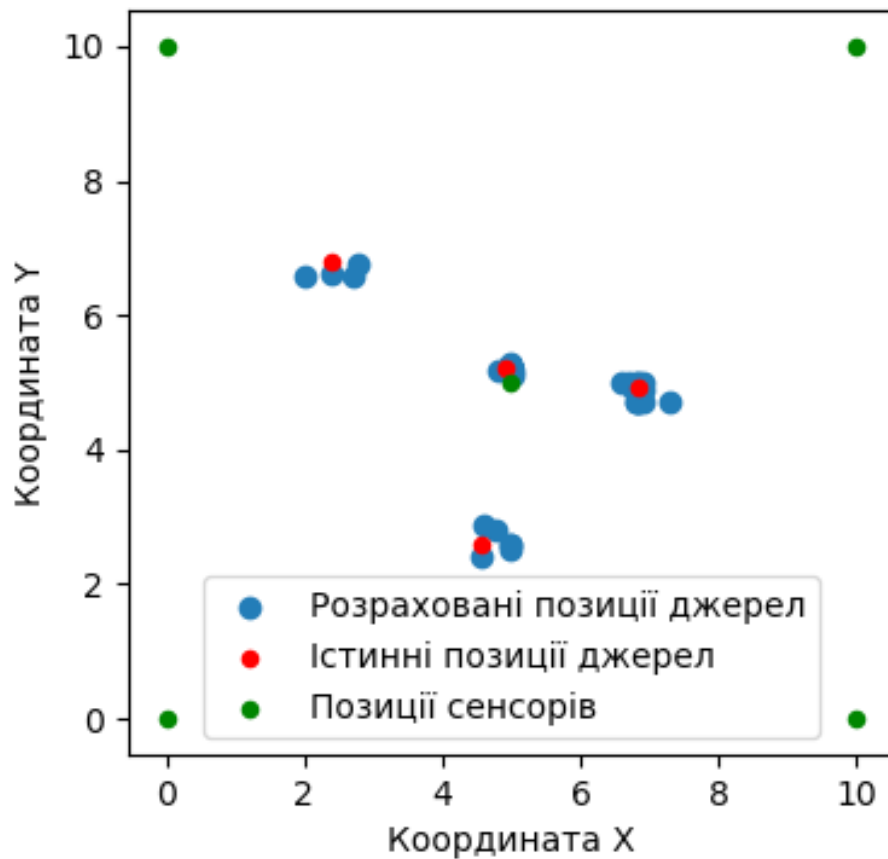


Рисунок 4.1.8 — Чотири джерела, правильні реакції

Прогнозовано, якість роботи мережі помітно нижча, ніж у попередньому випадку. Хоча кількість помилкових спрацювань є великою, система не видала жодної реакції, яка б не знаходилась у межах області скупчення сенсорів, а стосувалась би, наприклад, точки (10, 10).



Рисунок 4.1.9 — П'ять джерел, усі реакції

Джерел все більше, а тому і все більше конфліктів. Навіть візуально видно, що позиція верхнього лівого джерела розпізнаються вкрай погано. За той час, що його сигнали будуть зафіксовані усіма сенсорами, усі інші джерела видадуть свої. Поруч з ним немає інших, інформаційних звітів багато, а інтенсивності схожі, тому його позиція не буде розрахована правильно.

Реакції системи з точністю до 0.5 одиниць довжини

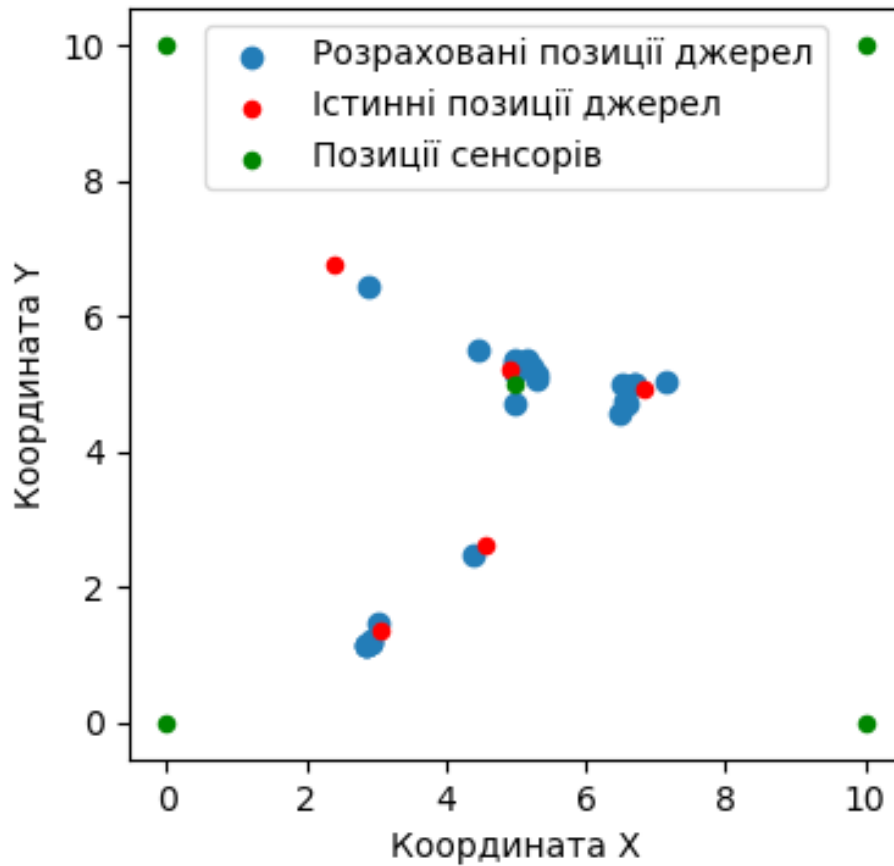


Рисунок 4.1.10 — П'ять джерел, правильні реакції

Як результат, найбільше правильних реакцій стосуються центральних двох джерел, у випадку яких навіть неправильна комбінація звітів все ж призводить до результатів, що задовольняють допуски.



Рисунок 4.1.11 — Десять джерел, усі реакції

Тепер багато джерел розміщено на невеликій площині. Виразно помітна схильність системи вказувати у район їх скупчення біля центрального сенсора, хоча наявні і зовсім неправильні реакції типу лівої або нижньої.

Реакції системи з точністю до 0.5 одиниць довжини

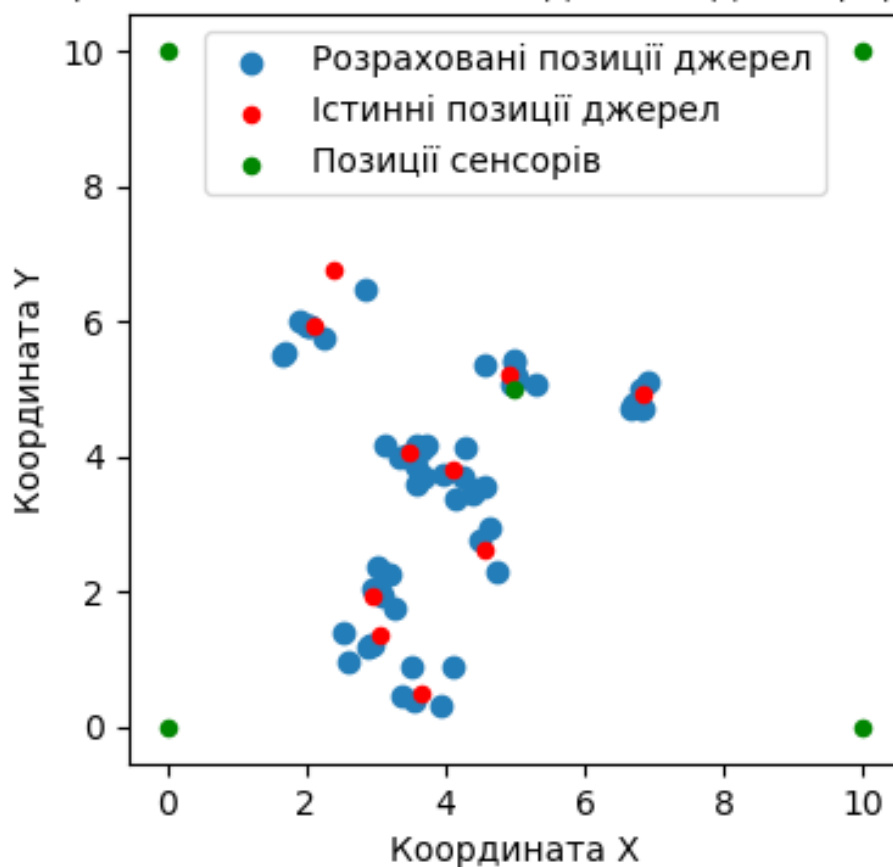


Рисунок 4.1.12 — Десять джерел, правильні реакції

Результуюча точність вища за зафіксовану у попередньому випадку, але тільки через взаємокомпенсування сигналів.

У таблиці 4.1.1 наведено показники роботи системи у режимах, проілюстрованих рисунками 4.1.1 — 4.1.12.

Таблиця 4.1.1 — Робота системи

Кількість джерел	Всього подій	Розпізнано подій	З них правильно
1	15	15	15
2	30	30	29
3	45	42	39
4	60	57	36
5	75	66	30
10	150	133	63

На рисунку 4.1.13 зображено залежність частини розпізнаних подій від кількості джерел звуку.

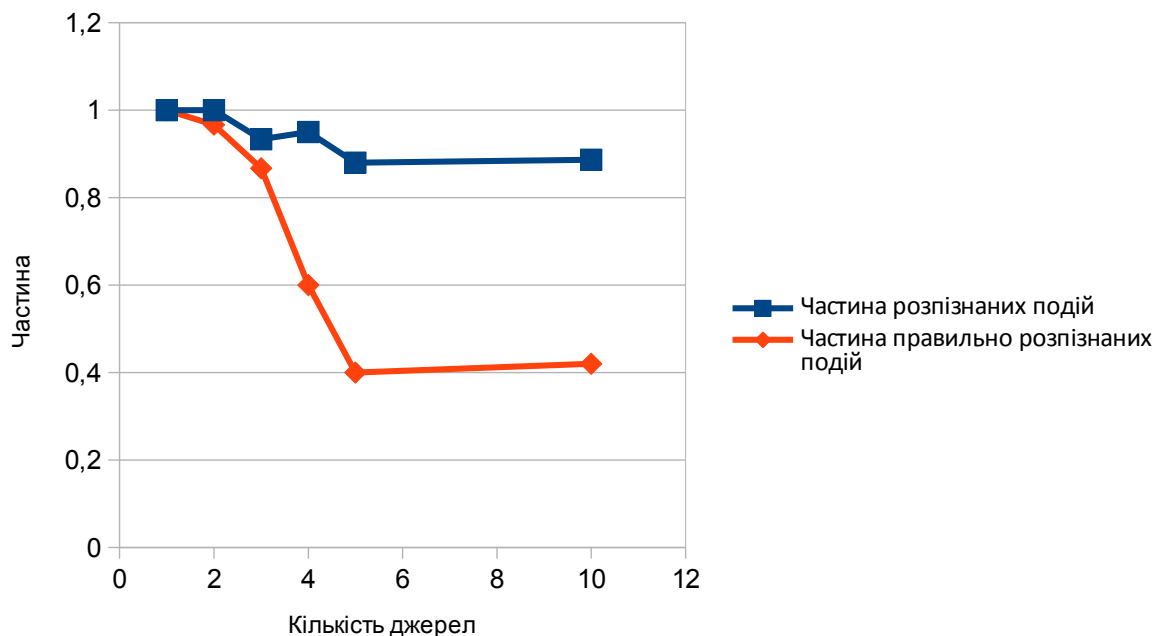


Рисунок 4.1.13 - Залежність частини розпізнаних подій від кількості джерел звуку

Таким чином, система здатна коректно працювати не менш, як у 85% випадках за кількості джерел, що генерують звукові події близької інтенсивності, не більшої за 3. Подальше збільшення числа джерел призводить до того, що система не може коректно виокремити їх сигнали, що призводить до значного падіння точності розпізнавання.

У будь-якому випадку, хоча система і не здатна розпізнати окремі джерела звуку при збільшенні їх числа, розраховані координати вказують на райони скупчення джерел, що і пояснює лише незначну зміну якості розпізнавання при збільшенні числа джерел від 5 до 10.

4.2 Фіксовані джерела, збільшені інтервали генерації

На рисунках 4.2.1 — 4.2.12 зображено поведінку системи при збільшенні числа джерел звуку, що генерують події близької інтенсивності (в межах $[100, 200)$ одиниць інтенсивності) з розширеними межами інтервалів генерації (в межах $[50, 200]$ одиниць часу)).

Правильною вважалась реакція на подію, якщо розраховані координати X та Y джерела звуку відрізнялись від істинних не більше, ніж на 0.5 одиниць довжини.

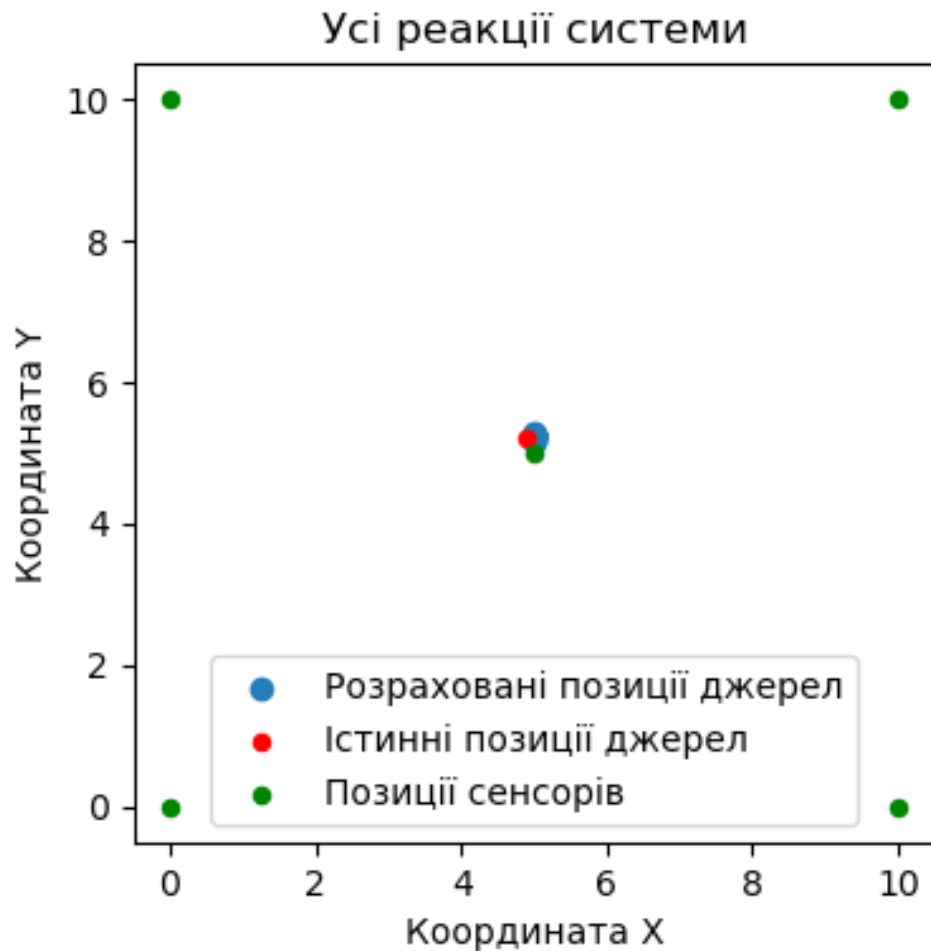


Рисунок 4.2.1 — Одне джерело, усі реакції

Точність не змінилась і не повинна була змінюватись.

Реакції системи з точністю до 0.5 одиниць довжини

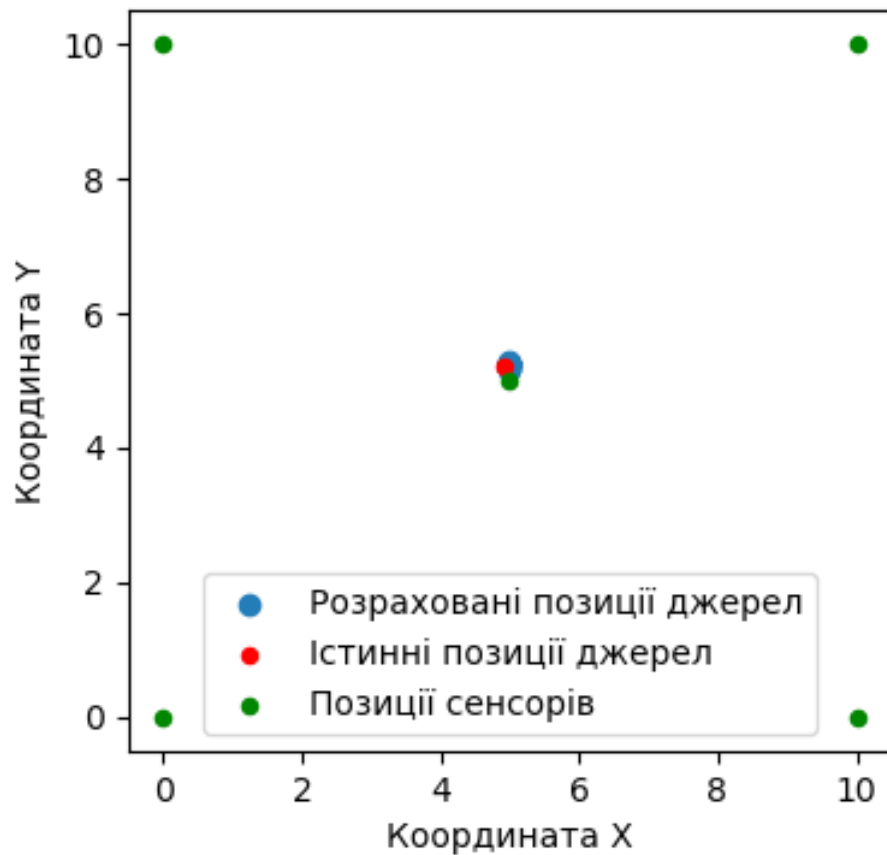


Рисунок 4.2.2 — Одне джерело, правильні реакції

Інтервал між генераціями подій високий порівняно з часом надходження хвиль до сенсорів, тому його подальше збільшення нічого не дало.

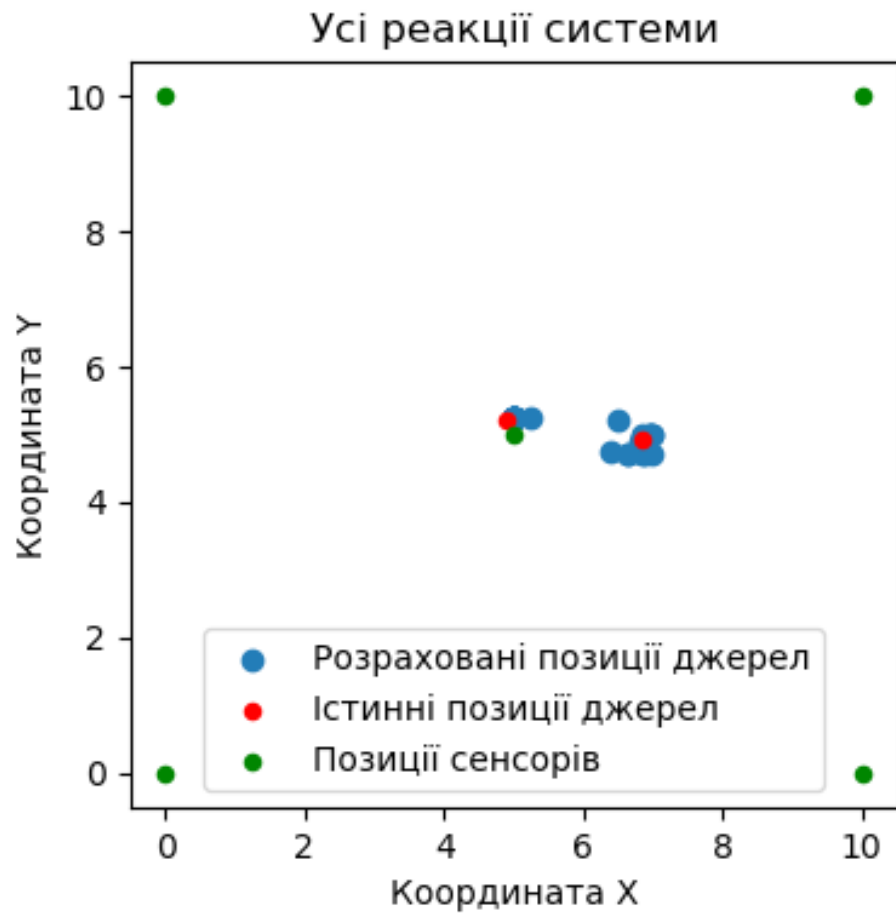


Рисунок 4.2.3 — Два джерела, усі реакції

За цього випадку досяглось повне уникнення конфліктів.

Реакції системи з точністю до 0.5 одиниць довжини

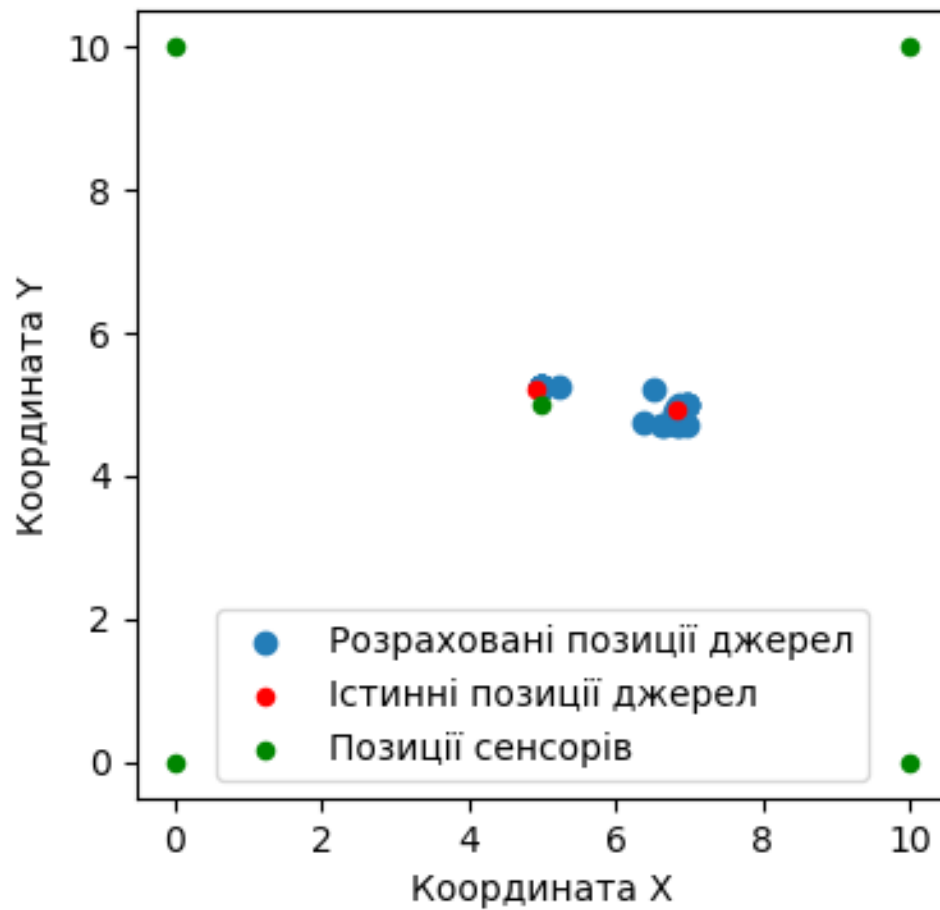


Рисунок 4.2.4 — Два джерела, правильні реакції

Усі реакції системи є правильними, оскільки вона може чітко виокремити сигнали від обох джерел.

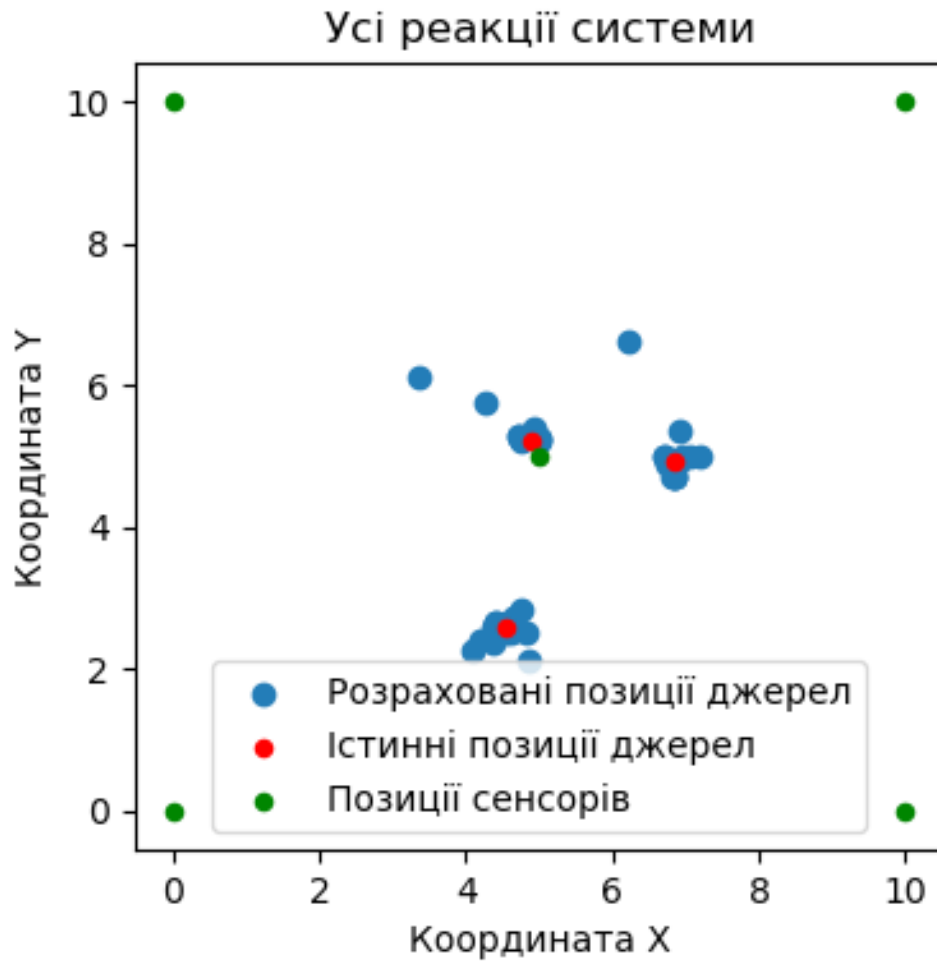


Рисунок 4.2.5 — Три джерела, усі реакції

У тих небагатьох випадках, коли конфлікти все ж виникають, реакції системи залишаються неприйнятними.

Реакції системи з точністю до 0.5 одиниць довжини

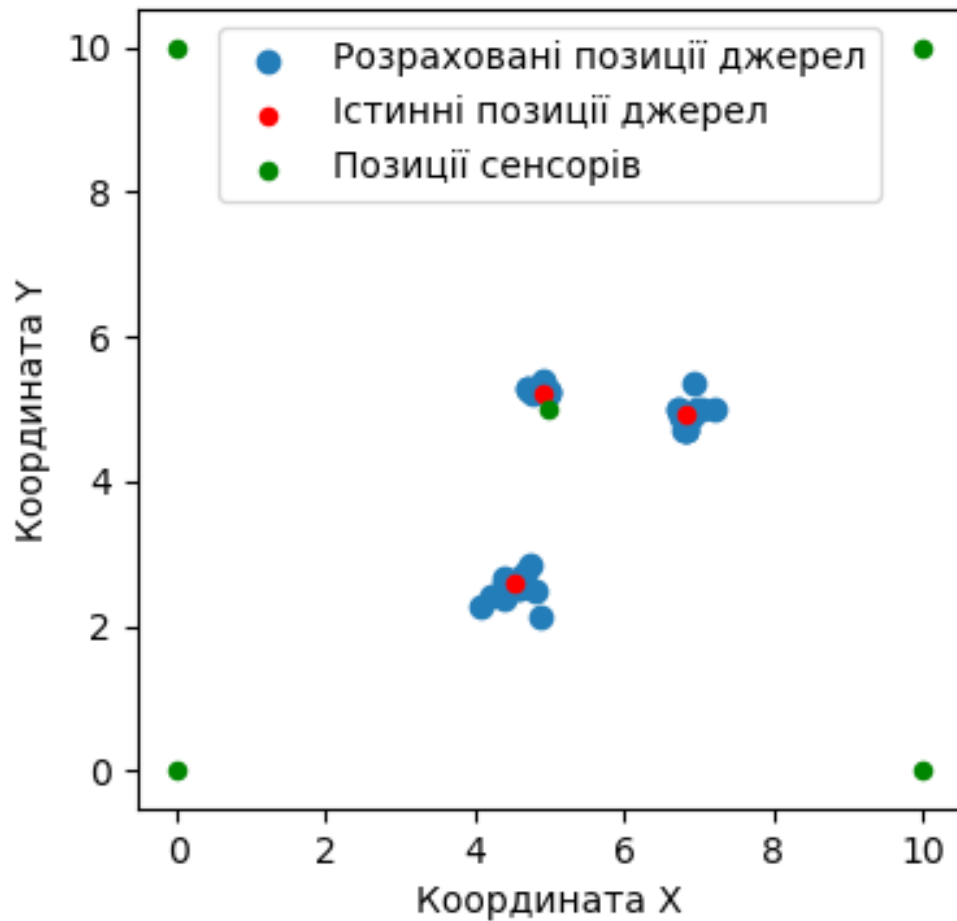


Рисунок 4.2.6 — Три джерела, правильні реакції

Загальна ситуація не змінилась порівняно з попередніми налаштуваннями.

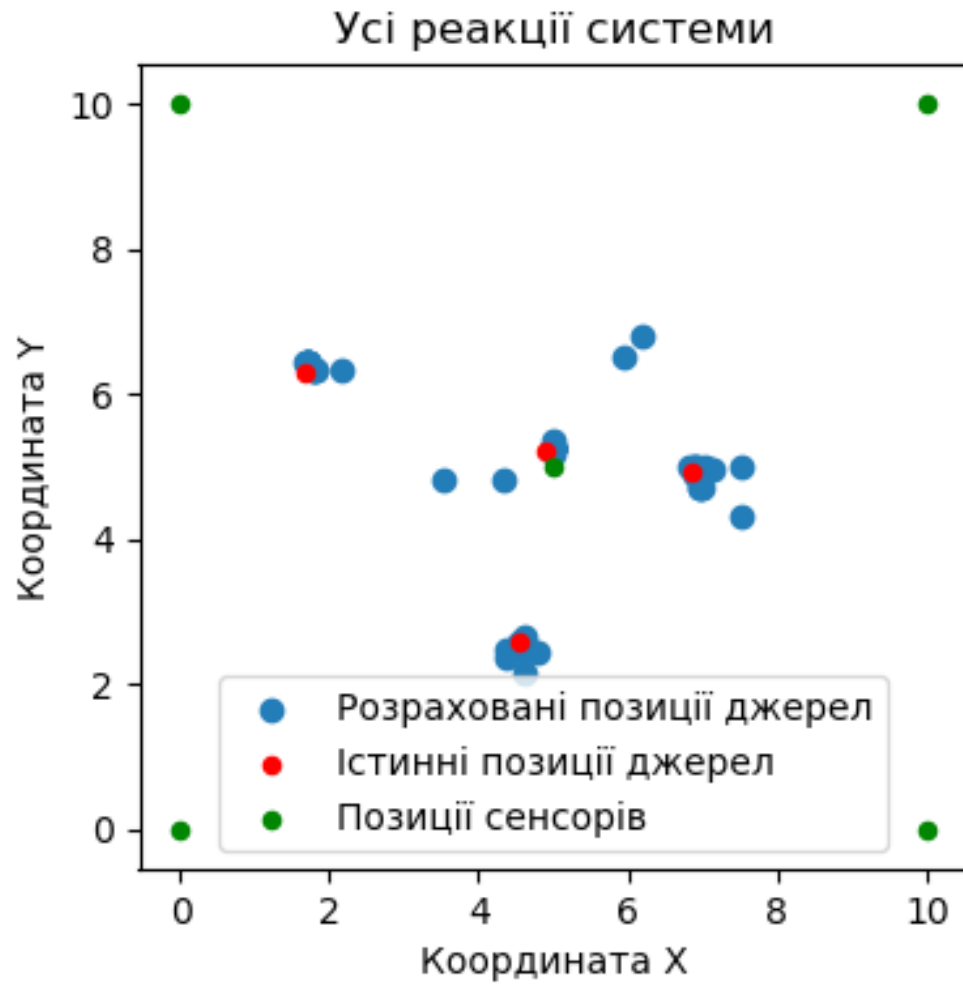


Рисунок 4.2.7 — Чотири джерела, усі реакції

Найбільш помітними є зміни у цьому випадку. За наявності чотирьох джерел звуку точність розпізнавання підвищилась суттєво.

Реакції системи з точністю до 0.5 одиниць довжини

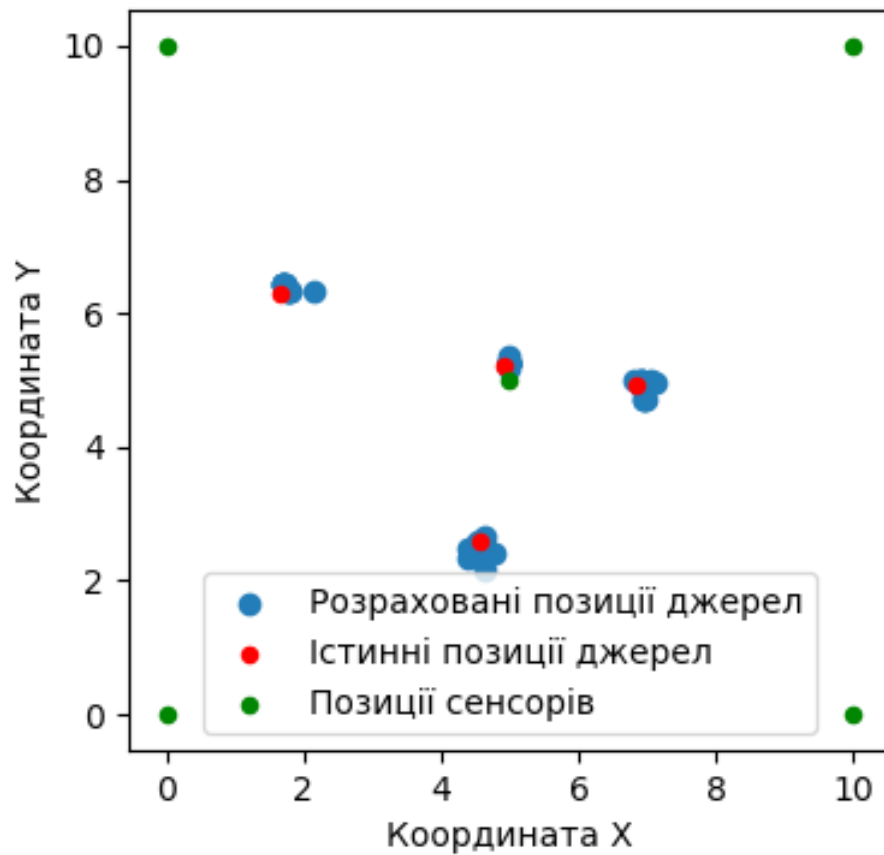


Рисунок 4.2.8 — Чотири джерела, правильні реакції

Така точність досягається саме за рахунок зменшення числа конфліктів, що виникли впродовж роботи системи.

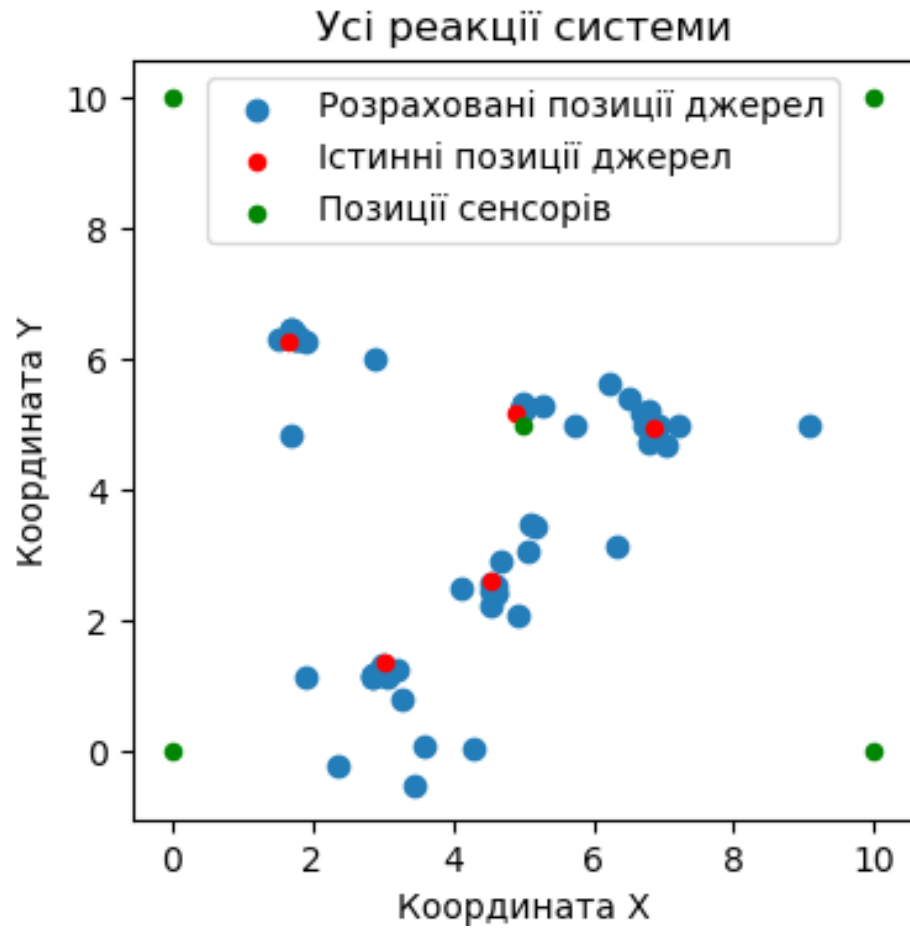


Рисунок 4.2.9 — П'ять джерел, усі реакції

Як і у попередньому випадку, помітне значне покращення роботи системи. Все ще спостерігається тенденція до вказування системою в район скупчення джерел звуку.

Реакції системи з точністю до 0.5 одиниць довжини

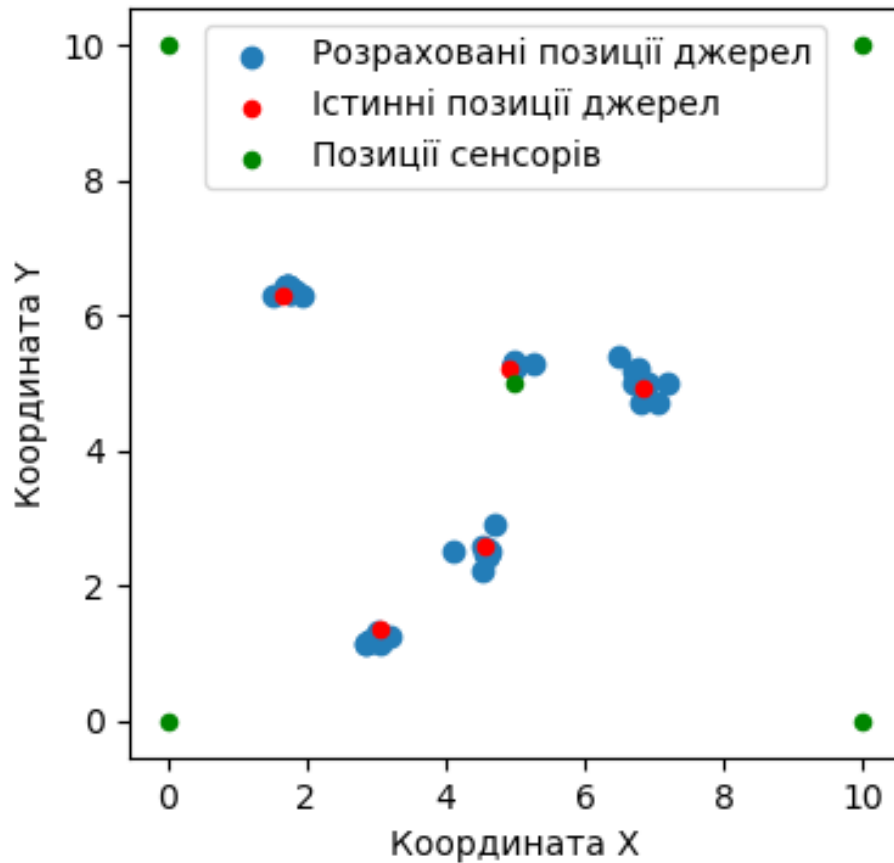


Рисунок 4.2.10 — П'ять джерел, правильні реакції

При цьому також система може коректно виокремити сигнали від лівого верхнього джерела, що було недосяжним за попереднього набору параметрів.

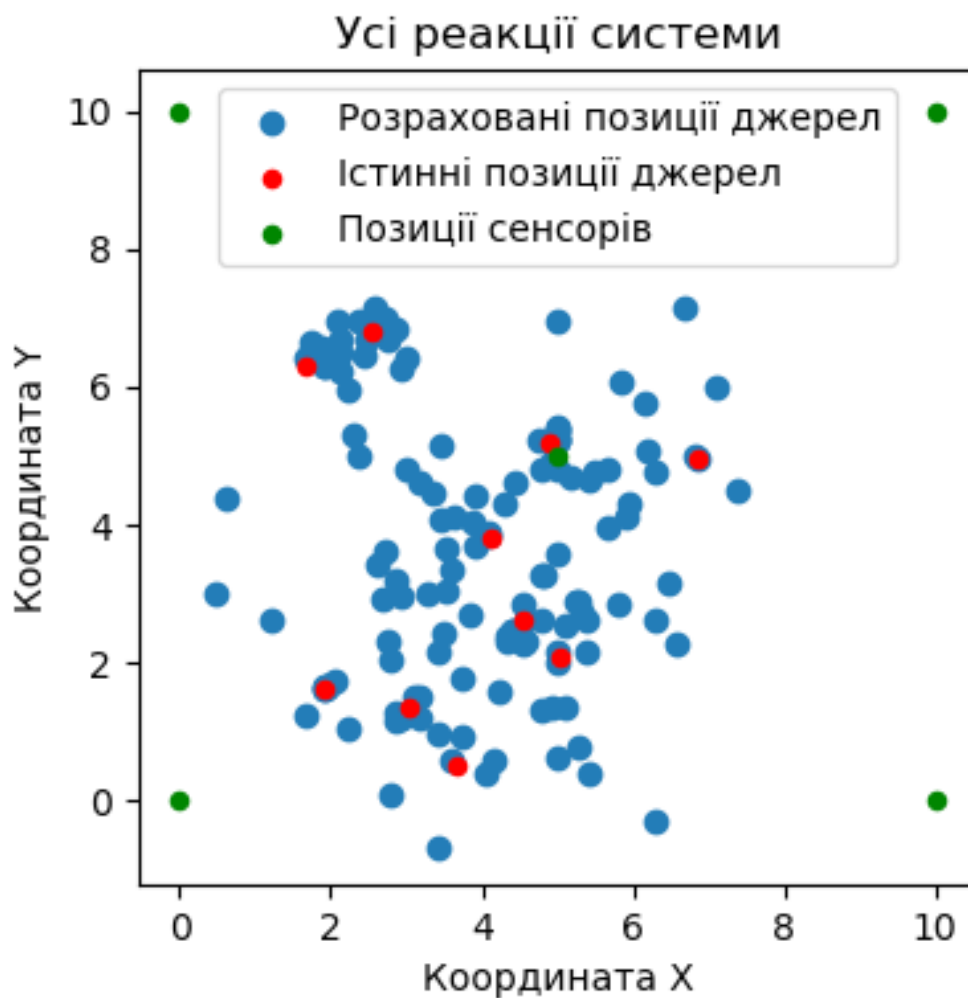


Рисунок 4.2.11 — Десять джерел, усі реакції

У випадку десяти джерел, що знаходяться поруч, зміна параметрів справила незначний вплив і розпізнати їх всі система не в змозі.

Реакції системи з точністю до 0.5 одиниць довжини

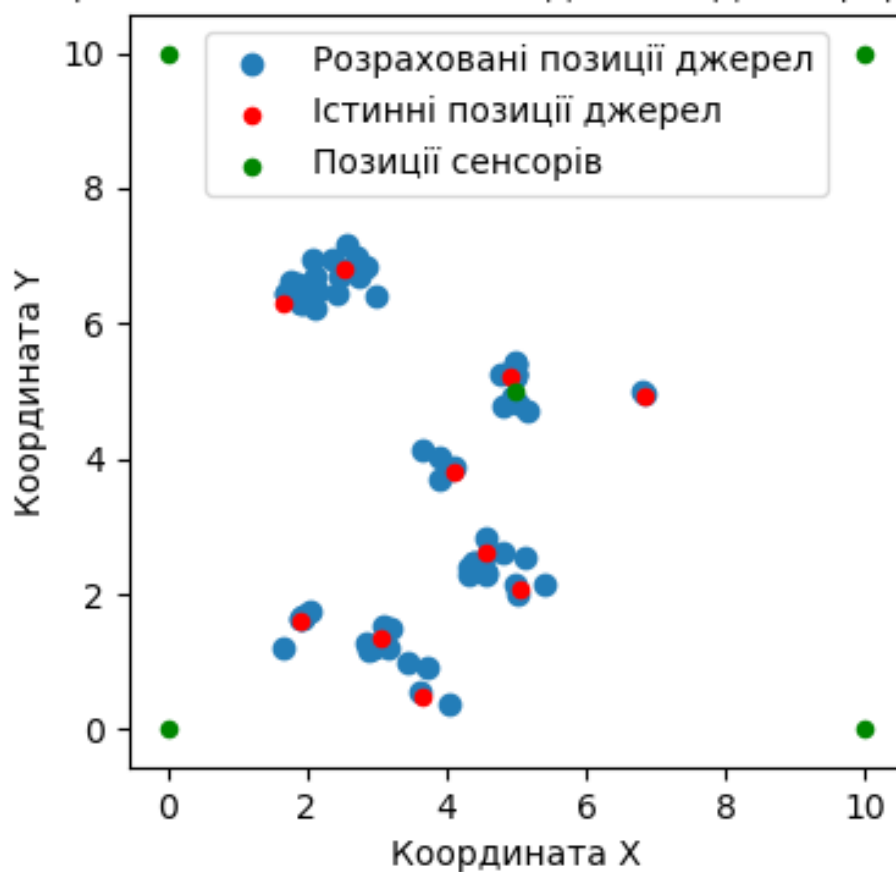


Рисунок 4.2.12 — Десять джерел, правильні реакції

Показники роботи мережі змінились незначно порівняно з попереднім випадком.

У таблиці 4.2.1 наведено показники роботи системи у режимах, проілюстрованих рисунками 4.2.1 — 4.2.12.

Таблиця 4.2.1 — Робота системи

Кількість джерел	Всього подій	Розпізнано подій	З них правильно
1	15	15	15
2	30	30	30
3	45	42	39
4	60	55	49
5	75	70	54
10	150	138	71

На рисунку 4.2.13 зображено залежність частини розпізнаних подій

від кількості джерел звуку.

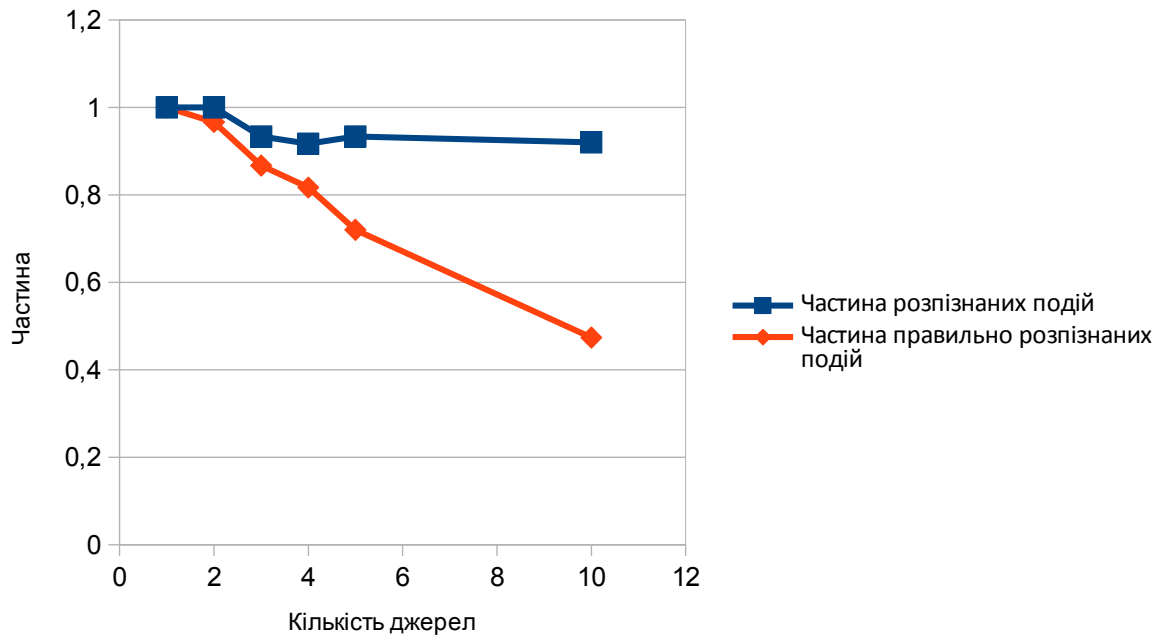


Рисунок 4.2.13 — Залежність частини розпізнаних подій від кількості джерел звуку

Таким чином, розширення меж інтервалів часу між генераціями звукових подій позитивно вплинуло на показники роботи системи при кількості джерел звуку від чотирьох і більше.

Це пояснюється тим, що сигнали від різних почали надходити на сенсори з більш помітною затримкою, що і призвело до зменшення числа помилок розпізнавання сигналів від кількох різних реальних джерел як таких, що належать одному хибному.

4.3 Рухоме джерело звуку

На рисунках 4.3.1 — 4.3.12 зображено поведінку системи за умови наявності одного джерела звуку, що рухається рівномірно прямолінійно, при зміні частоти генерації сигналів.

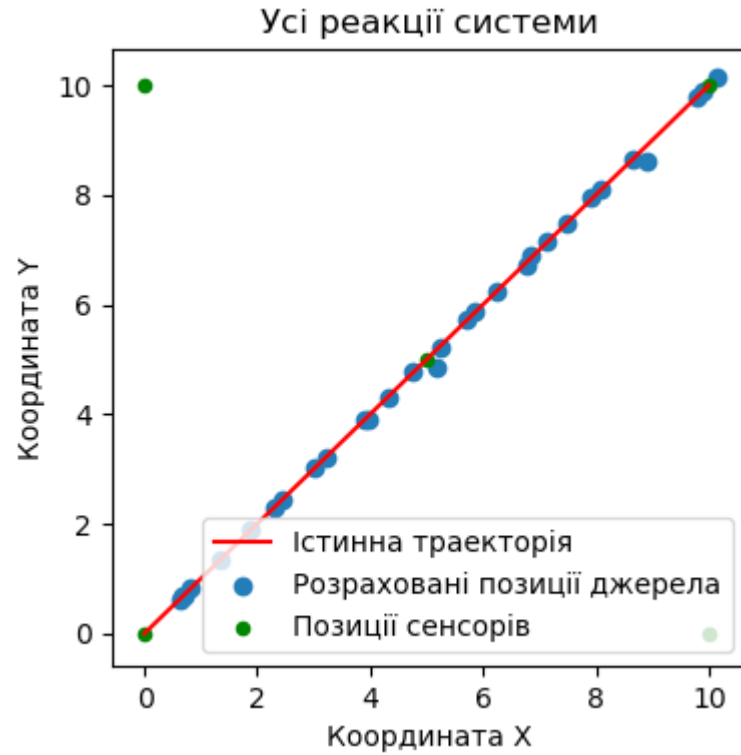


Рисунок 4.3.1 — Інтервал $[100, 200)$, усі реакції
Реакції системи з точністю до 0.5 одиниць довжини

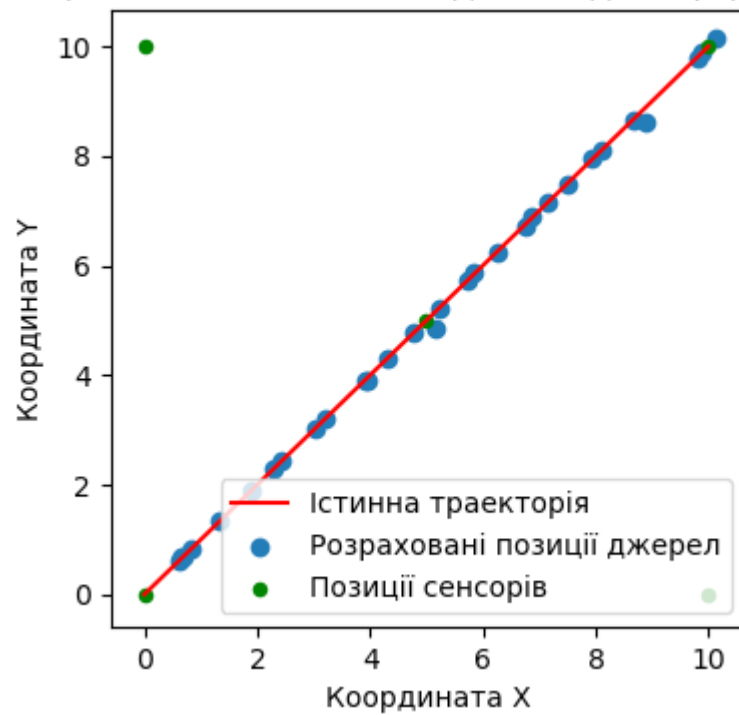


Рисунок 4.3.2 — Інтервал $[100, 200)$, правильні реакції

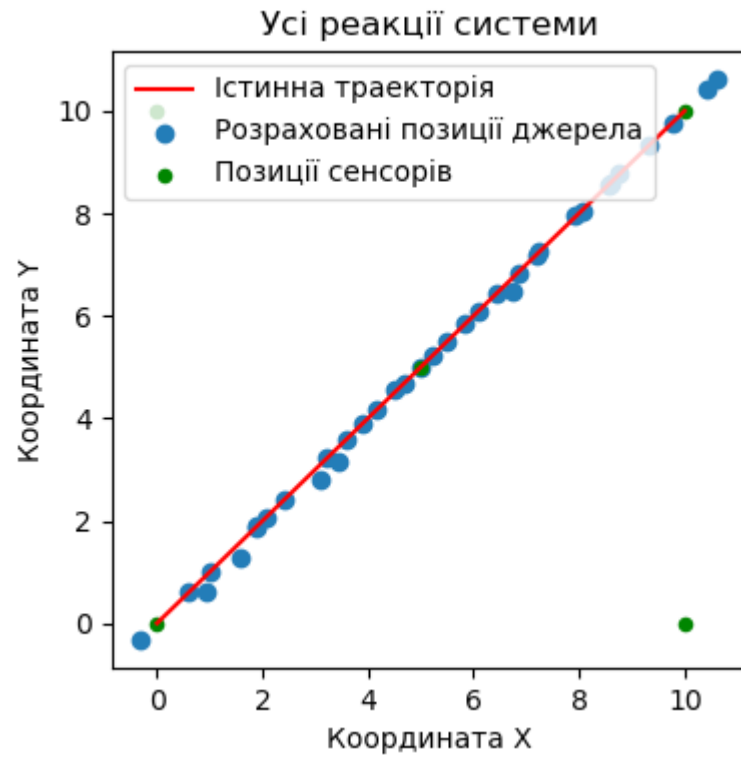


Рисунок 4.3.3 — Інтервал $[75, 150)$, усі реакції
Реакції системи з точністю до 0.5 одиниць довжини

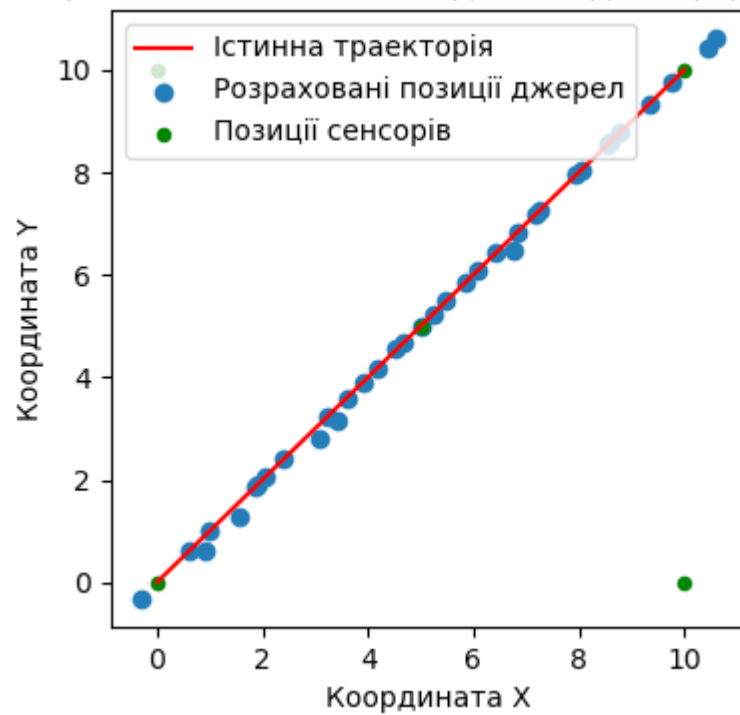


Рисунок 4.3.4 — Інтервал $[75, 150)$, правильні реакції

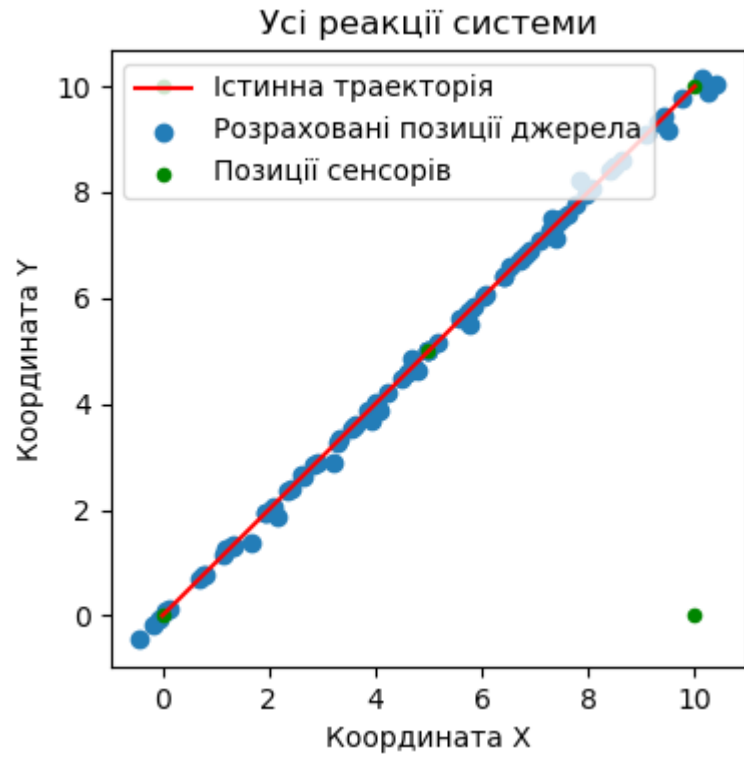


Рисунок 4.3.5 — Інтервал $[50, 100)$, усі реакції

Реакції системи з точністю до 0.5 одиниць довжини

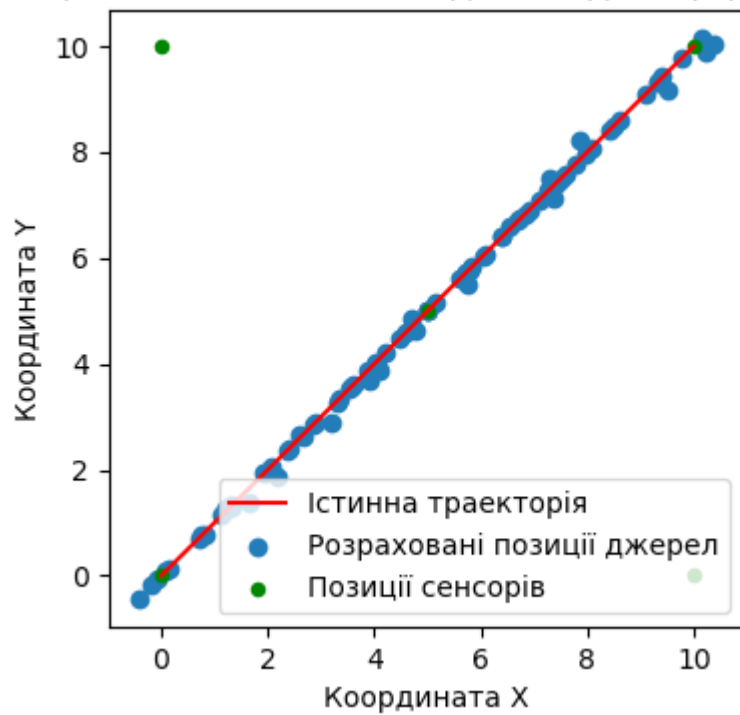


Рисунок 4.3.6 — Інтервал $[50, 100)$, правильні реакції

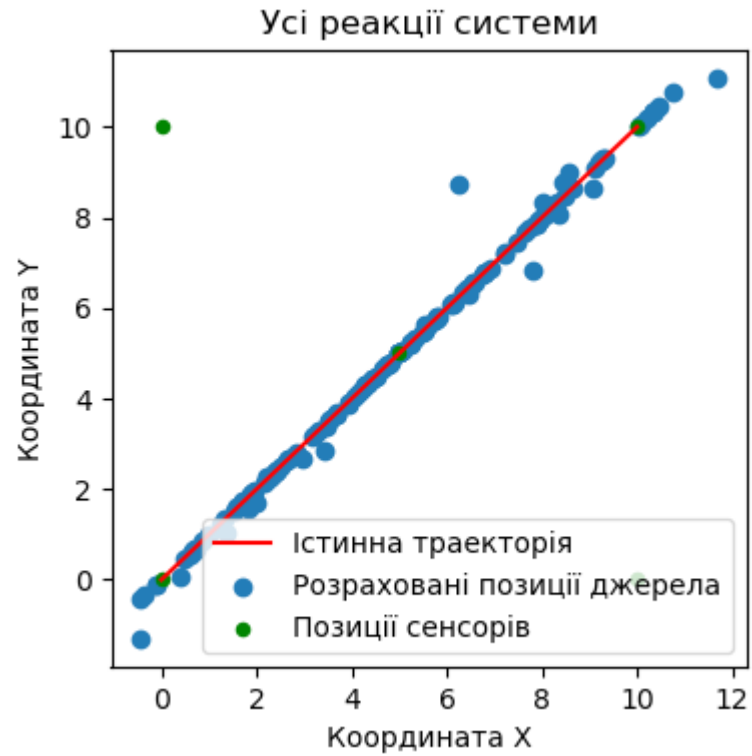


Рисунок 4.3.7 — Інтервал $[25, 50)$, усі реакції
Реакції системи з точністю до 0.5 одиниць довжини

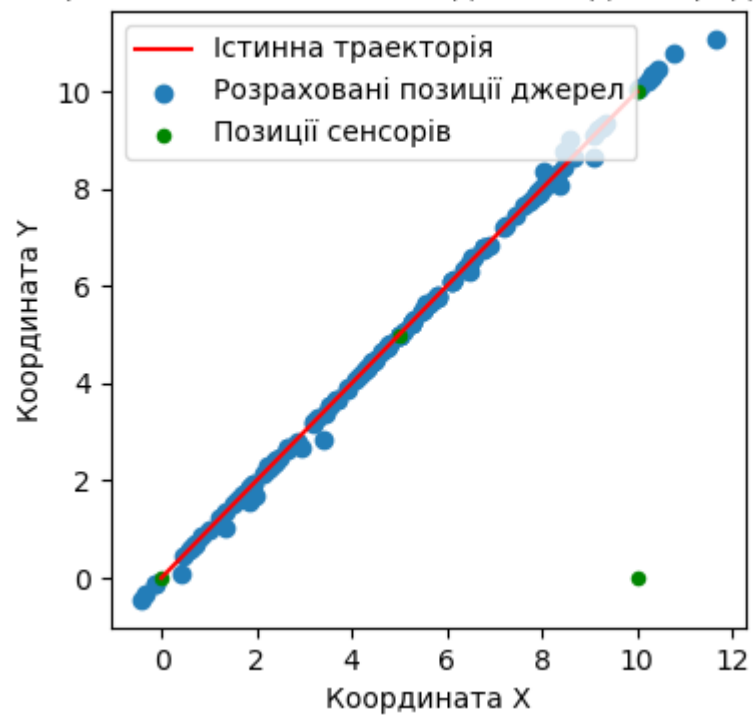


Рисунок 4.3.8 — Інтервал $[25, 50)$, правильні реакції

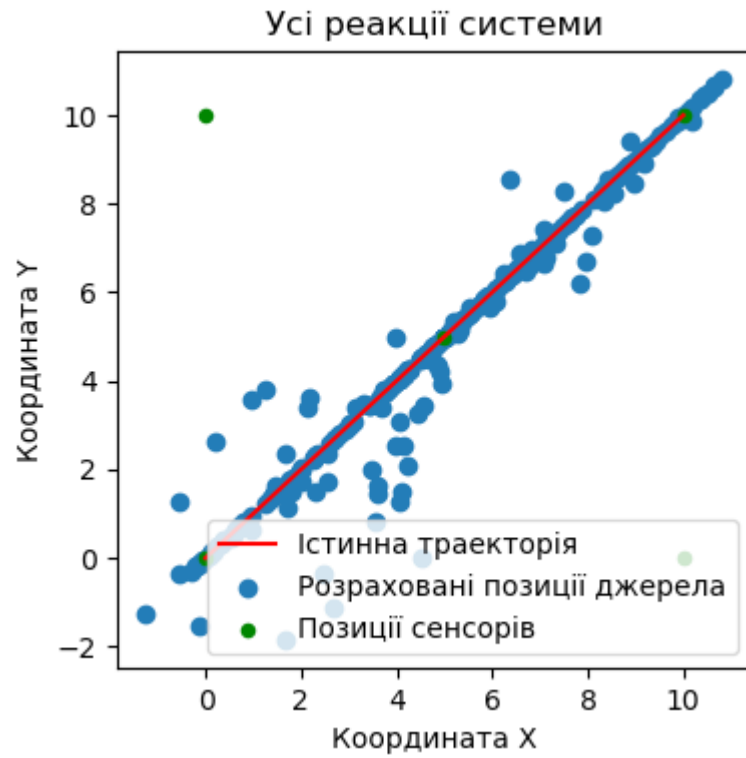


Рисунок 4.3.9 — Інтервал $[10, 20)$, усі реакції
Реакції системи з точністю до 0.5 одиниць довжини

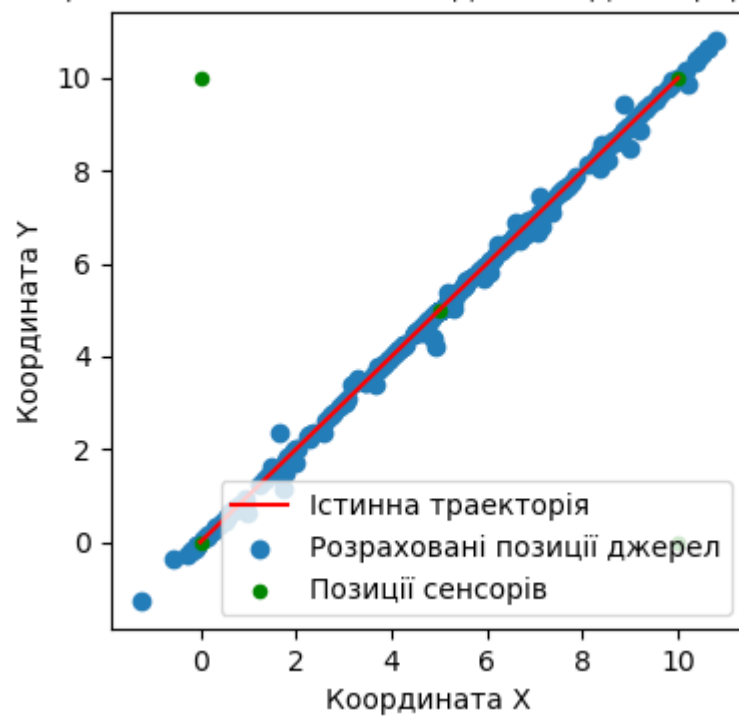


Рисунок 4.3.10 — Інтервал $[10, 20)$, правильні реакції



Рисунок 4.3.11 — Інтервал $[1, 110)$, усі реакції

Реакції системи з точністю до 0.5 одиниць довжини

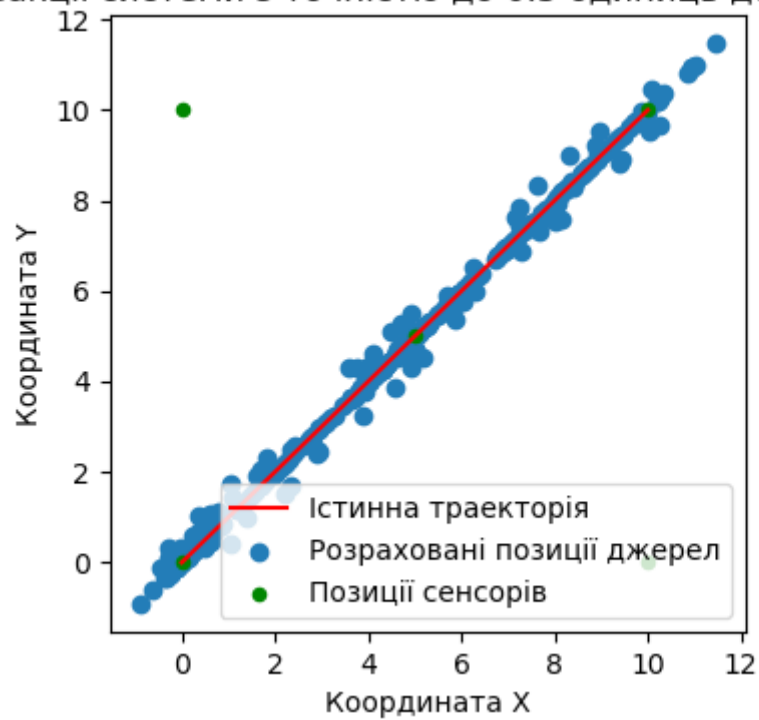


Рисунок 4.3.12 — Інтервал $[1, 10)$, правильні реакції

У таблиці 4.3.1 наведено показники роботи системи у режимах, проілюстрованих рисунками 4.3.1 — 4.3.12 .

Таблиця 4.3.1 — Робота системи

Межі інтервалів, одиниць часу	Всього подій	Розпізнано подій	З них правильно
[100, 200)	30	30	30
[75, 150)	36	36	36
[50, 100)	86	83	83
[25, 50)	153	146	143
[10, 20)	285	280	248
[1, 10)	584	571	382

На рисунку 4.3.13 зображено залежність частини розпізнаних подій від інтервалів часу між їх генераціями.

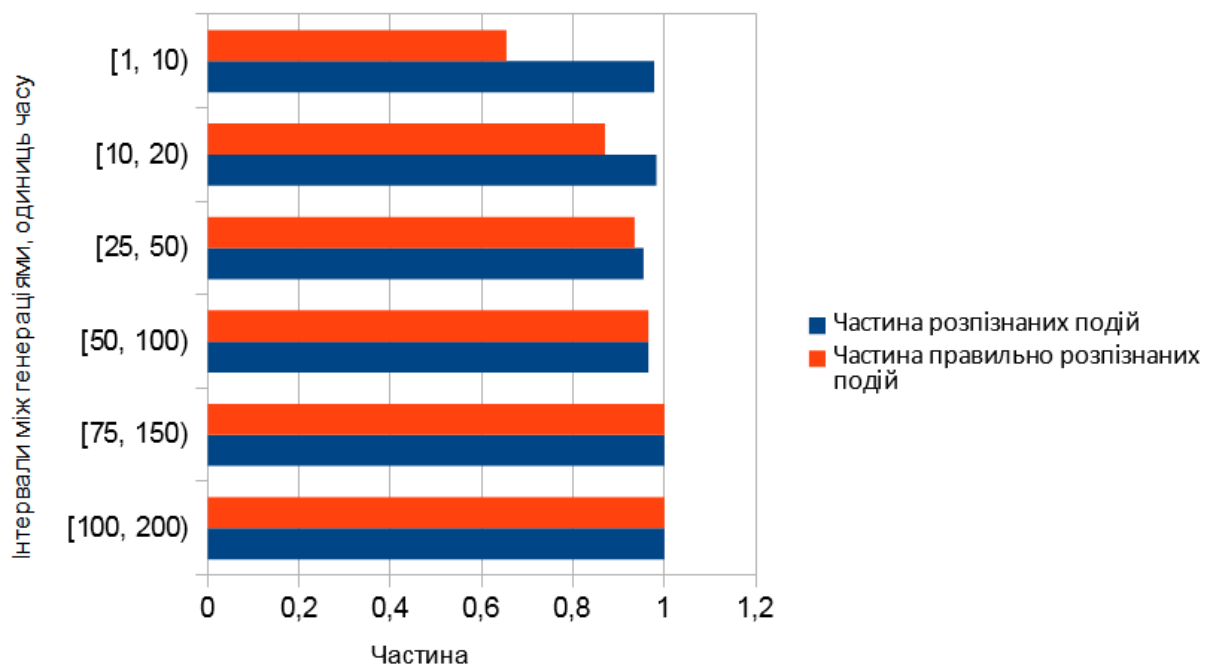


Рисунок 4.3.13 — Залежність частини розпізнаних подій від інтервалів між їх генераціями

Таким чином, за наявності лише одного джерела звуку повністю виключаються помилки, коли сигнали від кількох різних реальних джерел розпізнані як такі, що належать одному хибному.

З іншого боку, все ще можливі ситуації фіксування одним сенсором вже декількох звукових подій, а іншим — жодної. Отже маючи декілька

можливих комбінацій звітів від сенсорів, система не здатна розпізнати серед них таку, що відноситься до справжньої події.

Цим і пояснюється падіння точності розпізнавання при збільшенні частоти генерації звукових подій.

4.4 Висновки

Проведено запуски моделі в різних режимах роботи. Позиції сенсорів залишались незмінними протягом роботи моделі, що є важливим для алгоритму TDOA. Джерела звуку могли як бути фіксованими, так і рухатись. Перевірялась поведінка системи за зміни кількості джерел звуку, а також частоти генерації сигналів. Генерувались звукові події близької інтенсивності і визначалась здатність системи до коректного розпізнавання координат місць їх походження. Задовільна точність визначення координат джерел звуку (не менше, ніж у 85% випадків) забезпечувалась за умов наявності не більше ніж чотирьох близько розміщених джерел близької інтенсивності. За подальшого збільшення числа джерел система втрачала здатність до виокремлення їх сигналів, але все ще могла вказувати у райони їх скупчення. Єдине джерело, яке знаходилося у русі, система добре розпізнавала за умови інтервалу генерації подій не меншого за [25, 50). Подальше звуження рамок інтервалу генерації призводило до погіршення якості розпізнавання, але дозволяло визначати приблизну траєкторію об'єкта.

ВИСНОВКИ

Моніторинг навколишнього середовища за допомогою сенсорних мереж в цілому і відслідковування координат невідомих об'єктів в тому числі розглянені у численних дослідженнях. В той час, як більша частина робіт присвячена неперервному стеженню за сигнатурою об'єкта спостереження за допомогою звукових чи магнітних сенсорів, розпізнавання одиночних та серійних звукових подій потребувало додаткового вивчення. Крім того, якість роботи подібних систем в умовах наявності багатьох об'єктів спостереження, а також шумів та завад була досліджена недостатньо.

Для визначення просторових координат об'єктів використано алгоритм TDOA, що зводиться до вирішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь. На отримання вихідних даних для алгоритму впливають характеристики використовуваних звукових сенсорів. Охоплена площа, розпізнавання звукових подій на якій є можливим, залежить від розміщення на ній сенсорів. Можливість відмови сенсорів у процесі роботи призводить до необхідності динамічної реконфігурації системи в таких випадках. Для успішного розпізнавання звукових подій недостатньо лише часу їх фіксації сенсорами, а додатково потрібна зафіксована інтенсивність. Звіти про розпізнані події фільтруються на предмет дублювання. Час реакції системи на подію залежить як від неконтрольованої складової, так і параметризованої частини (час очікування TDOA-групи та вихідного фільтра).

В роботі описано програмну модель, що імітує роботу сенсорної мережі та її зв'язок з серверами. Модель складається з компонентів, найбільш значущими з яких є середовище розповсюдження звуку, апаратні засоби, програмні засоби та мережа передачі даних. Середовище розповсюдження відповідальне за просування фронту звукової хвилі у

трьохвимірному просторі згідно заданих параметрів. Апаратні засоби включають в себе власне сенсори та узагальнену апаратну платформу, на якій працюють програмні засоби. Програмні засоби розділяються на контролери сенсорів та серверне програмне забезпечення. Мережу передачі даних складають мережні адаптери з категорії апаратних засобів, що пов'язані між собою середовищем передачі з заданими затримками. Команди на передачу та прийом даних віддають мережні контролери з категорії програмних засобів.

Побудована модель дозволяє досліджувати роботу сенсорних мереж у різних умовах за допомогою зміни відповідних налаштувань, а також аналізувати різні показники якості поведінки системи, включаючи точність розпізнавання, час реакції на подію та інші.

Проведено запуски моделі в різних режимах роботи. Позиції сенсорів залишались незмінними протягом роботи моделі, що є важливим для алгоритму TDOA. Джерела звуку були як фіксованими, так і рухомими. Перевірено поведінку системи за зміни кількості джерел звуку, а також частоти генерації сигналів. Генерувались звукові події близької інтенсивності і визначалась здатність системи до коректного розпізнавання координат місць їх походження. Задовільна точність визначення координат джерел звуку (не менше, ніж у 85% випадків) забезпечувалась за умов наявності не більше ніж чотирьох близько розміщених джерел близької інтенсивності. За подальшого збільшення числа джерел система втрачала здатність до виокремлення їх сигналів, але все ще могла вказувати у райони їх скупчення. Єдине джерело, яке знаходилося у русі, система добре розпізнавала за умови інтервалу генерації подій не меншого за [25, 50). Подальше звуження рамок інтервалу генерації призводило до погіршення якості розпізнавання, але дозволяло визначати приблизну траєкторію об'єкта.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Sebastian Bader, Enabling Autonomous Environmental Measurement Systems with Low-Power Wireless Sensor Networks, ISSN 1652-8948, ISBN 978-91-86694-14-2, 2011 // [Електронний ресурс] / — Режим доступу: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:387560/FULLTEXT01.pdf>
2. J. Porter, P. Arzberger, H.-W. Braun, P. Bryant, S. Gage, T. Hansen, P. Hanson, C.-C. Lin, F.-P. Lin, T. Kratz, W. Michener, S. Shapiro, and T. Williams, “Wireless Sensor Networks for Ecology,” *BioScience*, vol. 55, no. 7, pp. 561–572
3. G. Barrenetxea, F. Ingelrest, G. Schaefer, M. Vetterli, O. Couach, and M. Parlange, “Sensorscope: Out-of-the-box environmental monitoring,” *Proceedings of the 7th international conference on Information processing in sensor networks*, pp. 332–343
4. T. Wark, W. Hu, P. Corke, J. Hodge, A. Keto, B. Mackey, G. Foley, P. Sikka, and M. Brunig, “Springbrook: Challenges in developing a long-term, rainforest wireless sensor network,” *2008 International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing*, pp. 599–604
5. F. Ingelrest, G. Barrenetxea, G. Schaefer, M. Vetterli, O. Couach, and M. Parlange, “SensorScope: Application-Specific Sensor Network for Environmental Monitoring,” *ACM Transactions on Sensor Networks*, vol. 6, pp. 1–32
6. D. M. Doolin, “Wireless sensors for wildfire monitoring,” in *Proceedings of SPIE*, vol. 5765, pp. 477–484, SPIE
7. S. Bapat, V. Kulathumani, and A. Arora, "Reliable Estimation of Influence Fields for Classification and Tracking in Unreliable Sensor Networks," in *IEEE SRDS*
8. G. Padmavathi, D. Shanmugapriya and M. Kalaivani, "A Study on Vehicle Detection and Tracking Using Wireless Sensor Networks," *Wireless*

Sensor Network, Vol. 2 No. 2, 2010, pp. 173-185

9. Jonathan Isaac Chanin and Andrew R. Halloran, *Wireless Sensor Network for Monitoring Applications*, Worcester Polytechnic Institute, 2008 // [Электронный ресурс] / — Режим доступа: [https://web.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-030708-](https://web.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-030708-030227/unrestricted/Wireless_Sensor_Network_for_Monitoring_Applications.pdf)

[030227/unrestricted/Wireless_Sensor_Network_for_Monitoring_Applications.pdf](https://web.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-030708-030227/unrestricted/Wireless_Sensor_Network_for_Monitoring_Applications.pdf)

10. Tatiana Bokareva, Wen Hu, Salil Kanhere, Branko Ristic, Neil Gordon, Travis Bessell, Mark Rutten and Sanjay Jha, “Wireless Sensor Networks for Battlefield Surveillance”, *Proceedings of The Land Warfare Conference (LWC)*, October 2006 // [Электронный ресурс] / — Режим доступа:

<https://pdfs.semanticscholar.org/925d/76fc99229e8e599c805f3f2182666c24337a.pdf>.

11. Yunus Emre Aslan, Ibrahim Korpeoglu, Özgür Ulusoy, A framework for use of wireless sensor networks in forest fire detection and monitoring, *Computers, Environment and Urban Systems*, Volume 36, Issue 6, 2012, Pages 614-625, ISSN 0198-9715 // [Электронный ресурс] / — Режим доступа:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0198971512000300>

12. Hanming Qian, Ping Sun, Yingjiao Rong, Design Proposal of Self-Powered WSN Node for Battle Field Surveillance, *Energy Procedia*, Volume 16, Part B, 2012, Pages 753-757, ISSN 1876-6102 // [Электронный ресурс] / — Режим доступа:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610212001312>

13. I. Dietrich and F. Dressler, “On the lifetime of wireless sensor networks”, *ACM Transactions on Sensor Networks*, vol. 5, pp. 1–39, Feb. 2009

14. Regina Kaune, Accuracy Studies for TDOA and TOA Localization, Dept. SDF Fraunhofer FKIE/University of Bonn // [Электронный ресурс] / —

Режим доступа:

http://fusion.isif.org/proceedings/fusion12CD/html/pdf/056_271.pdf

15. TDOA Acoustic Localization // [Электронный ресурс] / — Режим доступа: https://s3-us-west-1.amazonaws.com/stevenjl-bucket/tdoa_localization.pdf

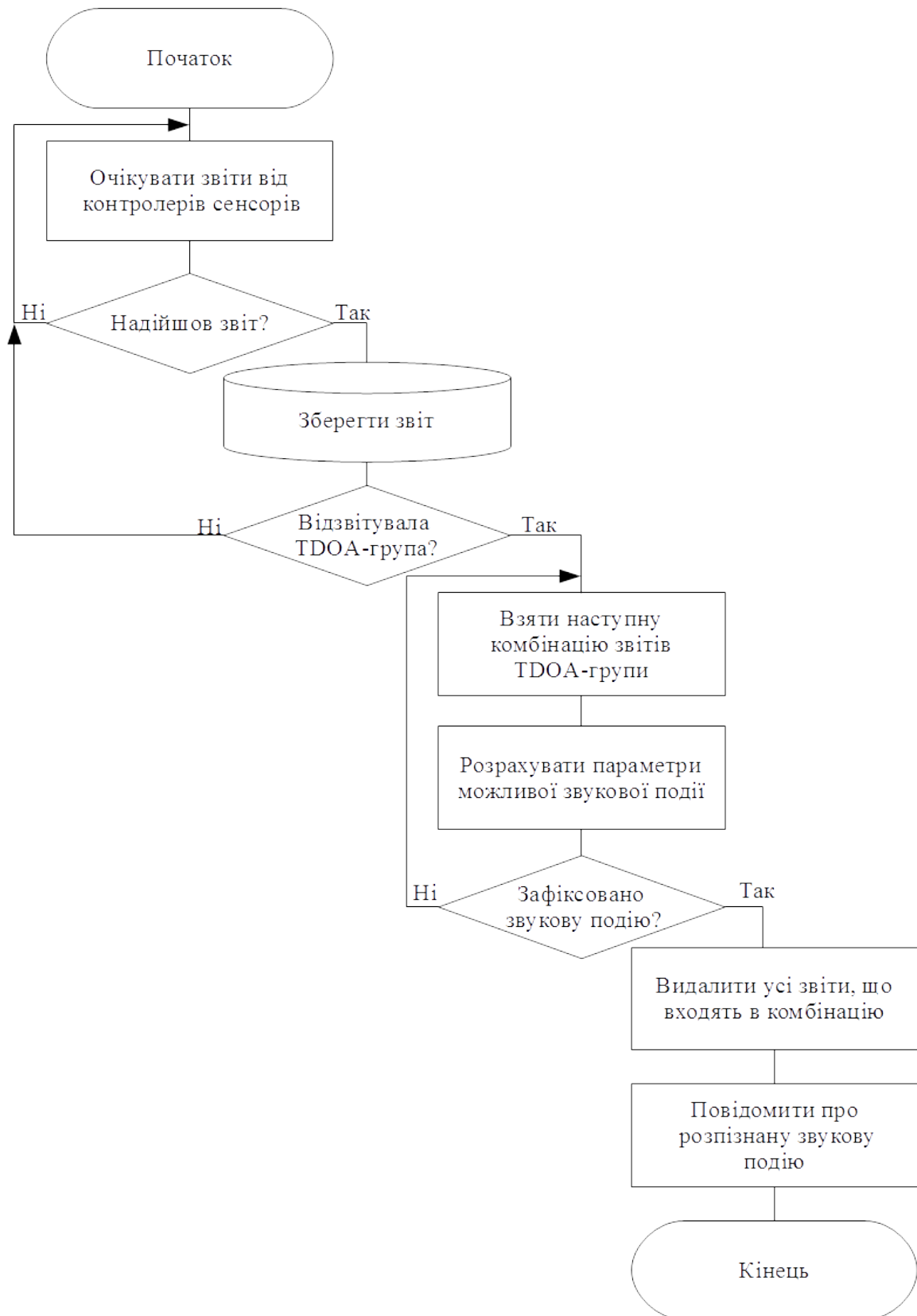
16. Wang Xu, He Zi-Shu, "A Weighed Least Square TDOA Location Algorithm for TDMA Multi-target", IJWMT, Vol.1, No.2, pp.16-25, 2011.

17. Calculation of the Speed of Sound in Air and the effective Temperature // [Электронный ресурс] / — Режим доступа: <http://www.sengpielaudio.com/calculator-speedsound.htm>

18. Air Temperature and Altitude // [Электронный ресурс] / — Режим доступа: https://www.engineeringtoolbox.com/air-altitude-temperature-d_461.html

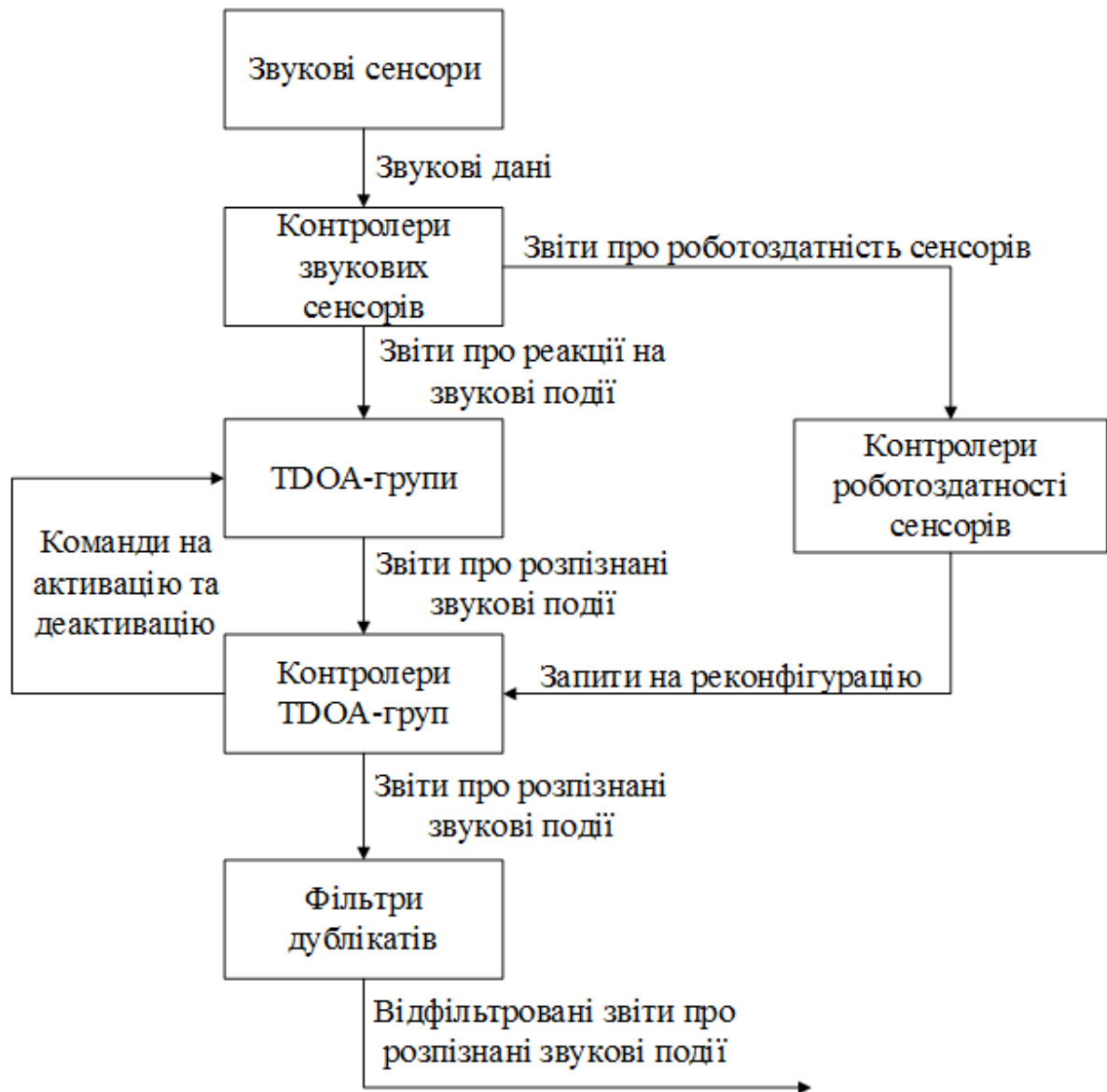
Додаток А. Копії графічних матеріалів

Схема роботи контролера TDOA-групи



Дончак О. В.

Узагальнена схема обміну повідомленнями



Узагальнена схема затримок

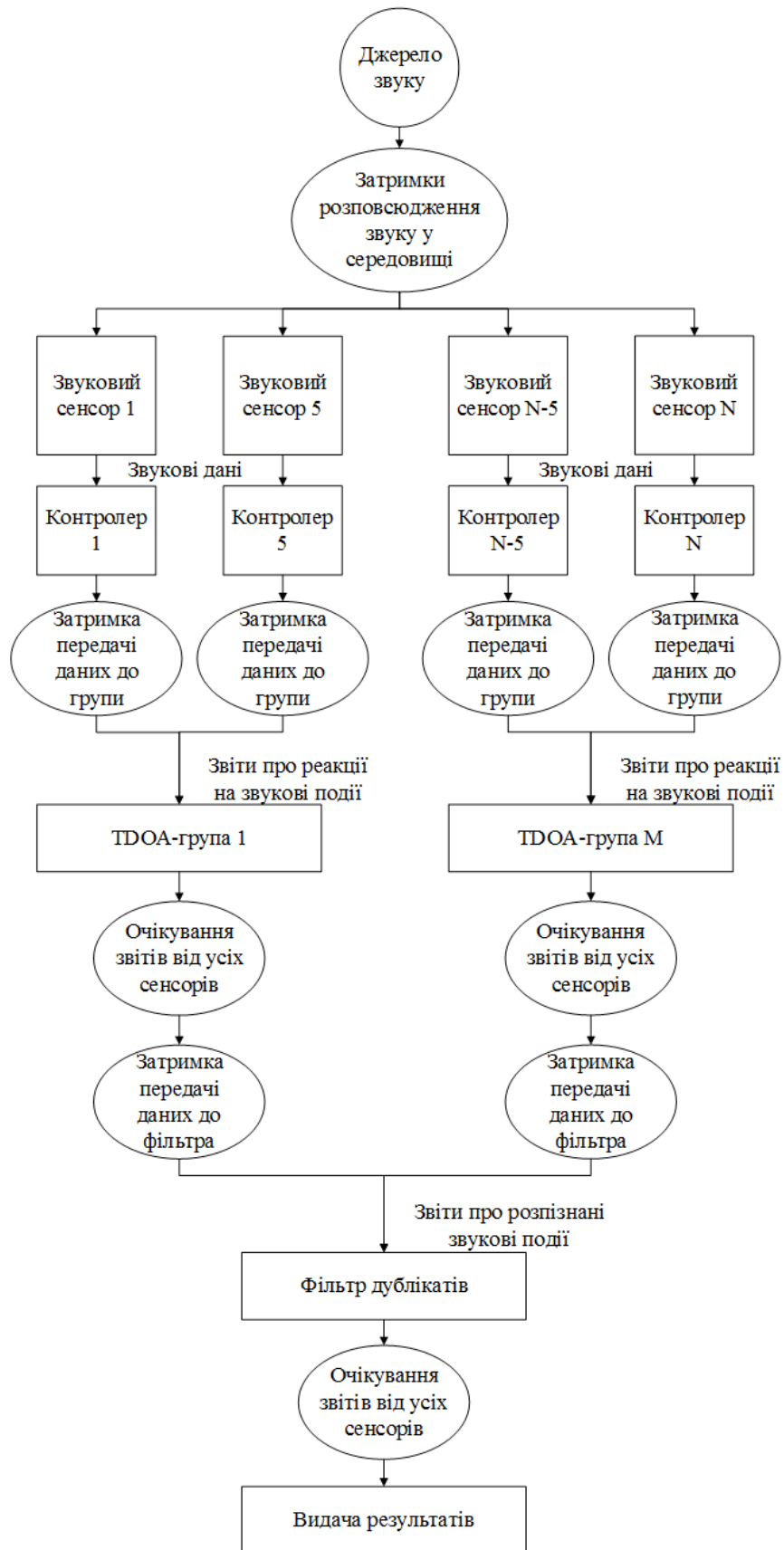


Схема функцій моделі

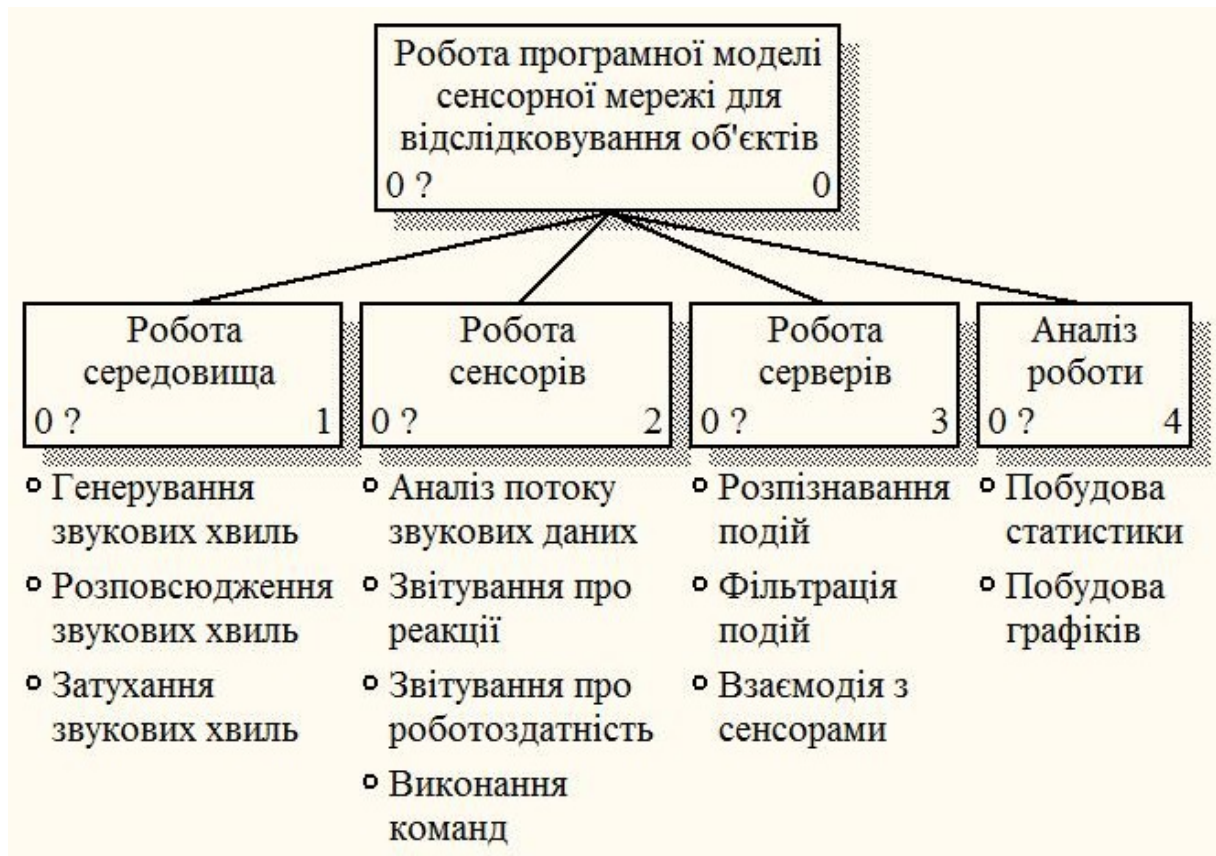
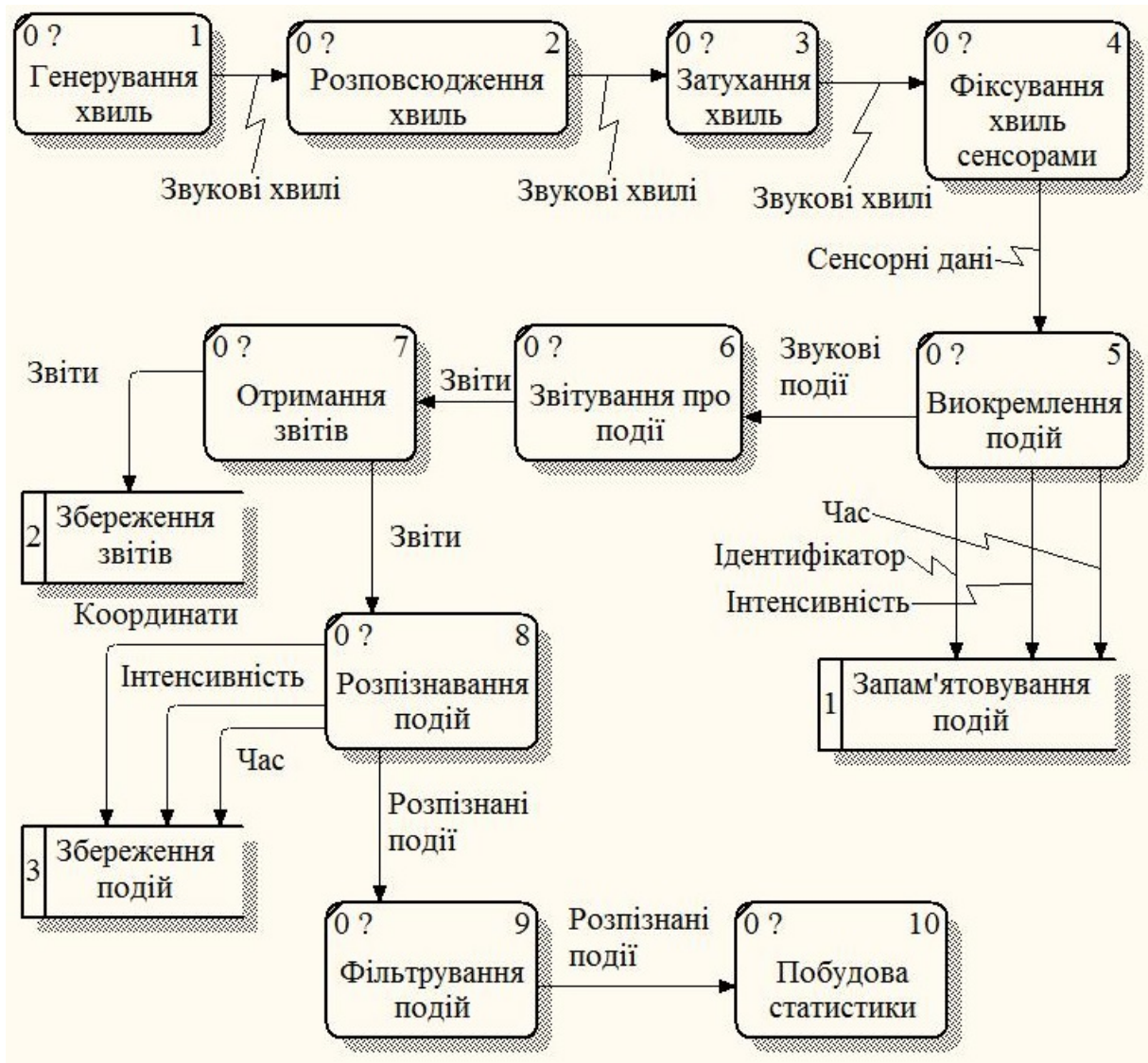


Схема потоку даних в моделі



Діаграма «сутність-зв'язок» моделі

